



André Filipe Rosendo Laranjeiro

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Simulação Numérica da Propagação de Ondas Bicromáticas

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor José Manuel Paixão Conde,
Professor Auxiliar, DEMI FCT/UNL

Júri

Presidente: Prof. Doutor Luís Miguel Chagas Gil
Arguente: Doutor Eric Lionel Didier
Vogal: Prof. Doutor José Manuel Paixão Conde



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2019

Simulação Numérica da Propagação de Ondas Bicromáticas

Copyright © André Filipe Rosendo Laranjeiro, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

A elaboração desta dissertação marca o final de um percurso de grande importância minha vida. Como tal, gostaria de agradecer a todos os que direta o indiretamente contribuíram para o alcance deste objetivo.

Em primeiro lugar, quero agradecer a todos os docentes do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova por todos os conhecimentos que me transmitiram, e em particular ao Professor Doutor José Manuel Paixão Conde pela sua orientação e ajuda na realização desta dissertação.

Em segundo lugar, gostaria de agradecer a toda a minha família por sempre me apoiar e incentivar em todos os momentos deste percurso, em particular aos meus pais pelo positivismo e tranquilidade que me transmitiram e aos meus avós maternos que me apoiaram, ajudaram, acompanharam e acolheram em sua casa durante os anos que passei neste curso.

Quero também agradecer à minha namorada que me ajudou e apoiou ao longo de todo este percurso com palavras de carinho e encorajamento.

Por fim, quero agradecer a todos os meus amigos que foram um forte apoio para o alcançar deste objetivo, em particular aos meus colegas Nuno e Tomás por me acompanharem ao longo de todo o curso, e ao Francisco e Filipe por serem uma grande ajuda nesta fase final da dissertação, pois através da entreaajuda que sempre existiu entre nós, foi mais fácil ultrapassar os obstáculos que foram aparecendo ao longo da tese.

RESUMO

Esta dissertação tem como objetivo a validação do código OpenFOAM, mais concretamente utilizando o *solver* olaFlow para a simulação de propagação e rebentação de ondas bicromáticas. Para tal, serão realizadas duas simulações num canal tridimensional de fundo variável.

Este estudo consiste numa formulação do problema em termos de modelo numérico, que passa por um estudo intensivo da malha de modo a obter os melhores resultados na malha final, e pela simulação de dois casos tridimensionais no canal anteriormente mencionado. Na primeira parte são realizadas simulações bidimensionais de uma malha de fundo constante de modo a testar malhas de diferentes graus de refinamento para determinar qual a ideal para prosseguir com o estudo. Na segunda fase, são realizadas as simulações tridimensionais no canal, que será modelado identicamente ao canal onde se realizaram previamente estudos experimentais com estas ondas, o canal do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). O canal em questão tem fundo variável e estreitamento de modo a produzir condições de quase rebentamento em algumas ondas.

Na fase final, são comparadas as progressões das superfícies livres das ondas simuladas no estudo com os resultados experimentais. Neste capítulo é possível observar a discordância entre os resultados nomeadamente na amplitude das ondas o que pode ser interpretado como um rebentamento precoce das mesmas. Foram também observadas algumas diferenças nas frequências presentes nas diferentes fases das ondas, o que pode ser também consequência do referido rebentamento.

Palavras-chave: OpenFOAM, olaFlow, ondas bicromáticas, simulação numérica, propagação de ondas.

ABSTRACT

This dissertation aims to validate the OpenFOAM code, specifically using the solver olaFlow for the simulation of propagation and breaking of bichromatic waves. For this, two simulations are performed in a three-dimensional variable bottom channel.

This study consists of a formulation of the problem in terms of numerical model, which will undergo an intensive study of the mesh to obtain the best results in the final mesh, and the simulation of two three-dimensional cases in the aforementioned channel. In the first part two-dimensional simulations of a constant background mesh are performed to test meshes of different degrees of refinement to determine which is ideal to proceed with the study. In the second phase, the three-dimensional simulations are performed in the channel, which will be modeled identically to the channel where previous experimental studies with these waves were performed, the channel of the National Civil Engineering Laboratory (LNEC). The channel in question has variable bottom and narrowing to produce near-burst conditions in some waves.

In the final phase, the free surface progressions of the simulated waves are compared with the experimental results. In this chapter it is possible to observe the disagreement between the results namely in the amplitude of the waves which can be interpreted as an early breaking of the waves. Some differences in the frequencies present in the different wave phases were also observed, which may also be a consequence of the said break.

Keywords: OpenFOAM, olaFlow, bichromatic waves, numerical simulation, wave propagation.

ÍNDICE

Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xv
Nomenclaturas e Símbolos	xvii
Abreviaturas e Acrónimos	xix
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da Dissertação	2
2 Contextualização Teórica	3
2.1 Tipos de ondas e mecanismos de formação	3
2.2 Teoria das ondas	5
2.2.1 Parâmetros que definem a onda	5
2.2.2 Teoria Linear de Ondas	7
2.2.3 Teoria Não Linear de Ondas	9
2.3 Ondas Bicromáticas	10
2.4 Ondas Irregulares	11
3 Modelo Numérico	13
3.1 Ferramentas computacionais	13
3.1.1 OpenFOAM	13
3.1.2 olaFlow	15
3.1.3 Geração de Malha	15
3.1.4 Objetos Função	15
3.1.5 Pós-processamento	16
3.2 Modelação Matemática e Numérica	17
3.2.1 Equações RANS	17
3.2.2 Modelos de Turbulência	20
3.2.3 Método VOF	21
3.2.4 Equações que governam o escoamento	21

3.2.5	Algoritmos de Resolução	22
3.2.6	Esquemas numéricos e de interpolação	26
4	Caracterização Numérico-Experimental e Discussão de Resultados	29
4.1	Caracterização Experimental	29
4.2	Teste da malha em canal 2D	30
4.3	Parâmetros das Simulações Finais	38
4.3.1	Controlo Temporal	38
4.3.2	Modelo de Turbulência	39
4.4	Caso com Variação do Fundo sem Estreitamento	39
4.4.1	Malha	39
4.4.2	Resultados	42
4.5	Caso com Variação de Fundo e Estreitamento	45
4.5.1	Malha	45
4.5.2	Comparação de Resultados	46
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	51
	Bibliografia	53
I	Árvore de Diretorias do Caso de Estudo do OpenFOAM®com o solver OlaFlow	55

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Distribuição esquemática da energia da onda por frequência. Adaptado de Massel 1996.	5
2.2	Onda simples progressiva, sinusoidal - Parâmetros de definição. Adaptado de Demirbilek e Vincent 2008	6
2.3	Perfil de onda bicromática (a preto), constituída pela adição de duas ondas monocromáticas lineares com a mesma altura (a vermelho e verde), e envelope (linha tracejada azul). Adaptado de Conde et al. 2013	11
3.1	Estrutura de funcionamento do algoritmo do OpenFOAM identificando os três passos principais (<i>OpenFOAM</i> ® (2013)).	14
3.2	Medição pontual típica da velocidade num escoamento turbulento. Adaptado de (Versteeg e Malalasekera 2007).	18
3.3	Fluxograma representativo do algoritmo PIMPLE aplicado ao solver <i>olaFlow</i> . "TFSL" representa o nível teórico de superfície livre. (Higuera et al.2012). . .	24
4.1	Vista lateral do canal (esquerda), gerador de ondas (centro) e vista de cima do canal (direita). Adaptado de Conde et al. 2013 (2013b)	30
4.2	Esquema do canal com vista longitudinal (cima) e planta (baixo). Adaptado de Conde et al. 2013.	30
4.3	Sondas colocadas no canal no LNEC.	31
4.4	Diagrama de le Mehaute para as ondas que compõem a onda bicromática de períodos 1.1s e 1.5s. Diagrama retirado de Le Mehaute 2013.	32
4.5	Esquema do canal simplificado indicando o número de elementos de cada bloco. Adaptado de Cardoso 2017.	32
4.6	Malha utilizada no teste de malha. Adaptado de Cardoso 2017.	33
4.7	Progressão da superfície livre e espectro de frequências (FFT) presente na onda analisadas no mesmo intervalo de tempo apresentado.	35
4.8	Progressão da superfície livre ao longo da geometria de teste da malha. . . .	36
4.9	Enquadramento da onda bicromática e ondas que a formam no envelope calculado.	37
4.10	Esquema de utilização de um ficheiro STL para a criação da rampa do canal. .	39
4.11	Ficheiro STL utilizado na criação da rampa do canal.	40
4.12	Zona inicial do canal onde é gerada a onda.	40

4.13	Início do canal.	41
4.14	Início da segunda rampa.	41
4.15	Final da última rampa.	41
4.16	Final do canal.	41
4.17	Propagação da superfície livre ao longo do canal sem estreitamento.	43
4.18	Comparação entre a propagação da superfície livre da onda bicromática simulada no canal sem estreitamento e a onda experimental no canal completo.	44
4.19	Esquema da utilização de um ficheiro STL para a formação do estreitamento do canal.	45
4.20	Início do canal.	45
4.21	Início do estreitamento.	45
4.22	Final do estreitamento.	45
4.23	Final do canal.	45
4.24	Propagação da onda bicromática no canal com estreitamento.	47
4.25	Comparação da propagação das superfícies livres de ambas as simulações.	48
4.26	Comparação entre a propagação da superfície livre da onda bicromática simulada no canal com o estreitamento e a onda experimental no canal completo.	49
I.1	Diagrama representativo das diretorias e ficheiros utilizados pelo olaFlow para a simulação de um caso de estudo.	56

ÍNDICE DE TABELAS

2.1	Mecanismos de formação dos vários tipos de ondas e gamas de períodos. Adaptado de Massel 1996.	4
2.2	Parâmetros que descrevem uma onda simples. Adaptado de Cardoso 2017. .	6
2.3	Caracterização das ondas consoante a profundidade a que se propagam. Adaptada de Demirbilek e Vincent 2008.	9
3.1	Expressões intermédias para o modelo de turbulência $k - \epsilon$. Adaptado de Cardoso 2017.	20
3.2	Coefficientes do modelo de turbulência $k - \epsilon$	21
3.3	Parâmetros de controlo do algoritmo PIMPLE.	25
3.4	Linear-solvers (escolhidos no <i>olaFlow</i>) utilizados pelo OpenFOAM ao longo da presente dissertação.	25
3.5	Esquemas numéricos e respetivos esquemas de interpolação utilizados no OpenFOAM.	26
4.1	Condições iniciais para o teste de malha e número de elementos.	31
4.2	Características da onda bicromática utilizada no teste da malha.	33
4.3	Parâmetros de simulação dos casos finais.	38

NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

θ	Fase	[rad].
ω	Frequência Angular	[rad · s ⁻¹].
ϵ	Dissipação de energia cinética	[m ² · s ⁻³].
ν	Viscosidade cinemática	[m ² · s ⁻¹].
ρ	Massa volúmica	[Kg · m ⁻³].
Φ	Potencial de velocidade	[m ² · s ⁻¹].
Ψ	Função corrente	[m ² · s ⁻¹].
η	Deslocamento da superfície livre	[m].
ψ	Ângulo de fase inicial	[rad].
δ	Delta de Kronecker	[-].
μ	Viscosidade dinâmica	[Kg · (m · s) ⁻¹].
α	Fração de volume de fluido	[-].
σ	Tensão superficial	[N · m ⁻¹].
κ	Curvatura da interface	[-].
ν_{eff}	Viscosidade cinemática efetiva	[m ² · s ⁻¹].
μ_{eff}	Viscosidade dinâmica efetiva	[Kg · (m · s) ⁻¹].
β_k, β_ϵ	Coefficientes de dissipação	[-].
ν_t	Viscosidade cinemática turbulenta	[m ² · s ⁻¹].
μ_t	Viscosidade dinâmica turbulenta	[Kg · (m · s) ⁻¹].
δt	Passo de tempo	[s].
C	Celeridade	[m · s ⁻¹].
Co	Número de Courant	[-].
D_k, D_ϵ	Coefficientes de difusão	[-].
F_i	Forças de fontes externas	[N].
H	Altura de onda	[m].
K	Número de onda	[rad · s ⁻¹].
L	Comprimento de onda	[m].
Re	Número de Reynolds	[-].
S	Tensor da taxa de deformações	[s ⁻¹].

T	Período	[s].
U	Modulo da velocidade	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$.
U_c	Velocidade de compressão	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$.
X	Vetor posição	[m].
a	Amplitude	[m].
c_i	Dimensões dos elementos de malha	[m].
d	Profundidade	[m].
g	Aceleração da gravidade	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$.
k	Energia cinética turbulenta	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}]$.
n	Número de elementos ao longo de uma aresta de malha	[-].
p	Pressão	[Pa].
p^*	Pressão pseudo-dinâmica	[Pa].
p_η	Pressão na superfície livre	[Pa].
t	Tempo	[s].
u, v, w	Componentes da velocidade na direção longitudinal, transversal e vertical	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$.
u'_i	Flutuação da velocidade	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$.
x, y, z	Coordenadas longitudinal, transversal e vertical do referencial cartesiano	[m].

ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

CFD	Computational Fluid Dynamics.
CFL	Courant–Friedrichs–Lewy.
DNS	Direct Numerical Simulation.
EDP	Equações Diferenciais às Derivadas Parciais.
FFT	Fast Fourier Transform.
LES	Large Eddy Simulation.
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
MVF	Método dos Volumes Finitos.
PIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations.
PISO	Pressure Implicit with Splitting of Operators.
RAM	Random Access Memory.
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes.
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations.
STL	Stereolithography.
VOF	Volume of Fluid.

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A curiosidade do ser humano pelo universo que o rodeia é algo incontornável e que nunca abandona o seu pensamento. Seja por necessidade de construção e aperfeiçoamento da qualidade de vida, ou por simples vontade de saber, a procura de novas tecnologias e ferramentas é incansável. Um dos tópicos mais curiosos para todos é o oceano, mais especificamente um dos seus fenómenos, as ondas. O estudo das ondas é pertinente para uma grande quantidade de aplicações, entre as quais se encontram a engenharia costeira e o aproveitamento da energia das ondas. No caso específico de Portugal, este estudo é especialmente relevante tendo em conta a dimensão da sua linha costeira. É de extrema importância conhecer e estudar o comportamento das ondas e o seu efeito, de modo a proteger o meio ambiente e as estruturas existentes na linha costeira. Com o aparecimento dos computadores, tem sido dada muita atenção à sua capacidade de realizar cálculos a uma velocidade antes impossível. Isto levou a um enorme desenvolvimento, especialmente nos últimos 50 anos, de *software*, métodos, teorias e ferramentas para aplicações de engenharia que vão desde o cálculo de estruturas a simulações no âmbito da dinâmica dos fluidos. Este último tema, tem sido extremamente desenvolvido no âmbito da simulação computacional variando desde simulações da aerodinâmica de aviões e carros a estudos de engenharia costeira. Este desenvolvimento tem sido tal, que a dinâmica de fluidos computacional (em inglês *Computational Fluid Dynamics* (CFD)) é, por vezes, preferida face a ensaios experimentais, uma vez que consegue muitas vezes resultados tão ou mais precisos que outros métodos ao mesmo tempo que implica menos custos e logística.

O desenvolvimento desta tecnologia tem levado a grandes e mais rápidos avanços no que diz respeito a encontrar soluções para problemas no âmbito da dinâmica de fluidos, assim como no desenvolvimento de melhores e novos produtos em diversas indústrias.

É então no sentido de aumentar a quantidade e qualidade de *software* capaz de realizar estes estudos, que dissertações como esta encontram a sua motivação.

1.2 Objetivos

O objetivo principal do presente trabalho é o estudo da propagação e rebentação de ondas bicromáticas, recorrendo a ferramentas computacionais, validando assim o código do software utilizado para este tipo de aplicação. O processo para atingir o objetivo passará por desenvolver a malha adequada a esta aplicação, estudar a geometria que tenha maior probabilidade de obter resultados comparáveis com a realidade e, por fim, compará-los com resultados experimentais.

1.3 Estrutura da Dissertação

Procurou-se organizar a dissertação de modo a que o seu estudo seja claro, objetivo e o seu raciocínio fácil de seguir. Para tal, esta está dividida em seis capítulos: Introdução, Contextualização Teórica, Modelo Numérico, Caracterização Numérico-Experimental e Discussão de Resultados e Conclusões e Trabalhos Futuros.

O primeiro capítulo, introduz o tema, o motivos que levaram a esta dissertação e o que se pretende alcançar com o estudo.

No segundo capítulo é feita uma introdução teórica a todos os tópicos que possam ser necessários para a compreensão do presente estudo. Neste capítulo abordam-se tópicos desde os mecanismos físicos das ondas às teorias que os explicam e ajudam a estudar. Deste modo, o leitor terá o mínimo conhecimento teórico necessário para o entendimento da dissertação.

No terceiro capítulo é introduzida a mecânica de fluidos computacional, para que o leitor possa entender os mecanismos e teorias que resultam no sucesso de uma simulação numérica, assim como os aspetos mais importantes para que os seus resultados sejam viáveis.

No capítulo quatro é então descrita toda a caracterização experimental. É explicado em detalhe os passos para a construção de malhas e seus testes, como se escolheram os modelos adequados ao problema em causa e os resultados obtidos. Na última parte deste capítulo estes são analisados e comparados entre si e são retiradas algumas conclusões sobre o que foi observado.

No sexto e último capítulo, são discutidas mais em profundidade algumas conclusões retiradas dos resultados do estudo e são apresentadas algumas sugestões e ideias para trabalhos futuros.

CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados conceitos teóricos importantes sobre formação, propagação e rebentação de ondas, assim como os seus variados tipos. Esta introdução teórica é importante pois servirá de apoio a uma melhor compreensão do presente trabalho na íntegra.

Serão apresentadas superficialmente os principais tipos de onda, assim como as teorias mais utilizadas para estudar as mesmas dando ênfase às mais relevantes para a dissertação, as ondas bicromáticas.

2.1 Tipos de ondas e mecanismos de formação

No estudo de ondas do oceano é fundamental a compreensão dos seus meios de formação. Assim sendo, para compreender a propagação e rebentação de ondas, é necessário compreender como se formam. A agitação marítima ocorre devido a diversas interações do oceano com inúmeros fenómenos. Entre estes está o vento que provoca trocas de energia com o oceano na sua superfície criando agitação. Este fenómeno pode combinar-se com vários outros fatores como a gravidade, o fundo oceânico ou a posição da lua que provoca as marés gerando vários tipos de ondas.

Com todos os tipos possíveis de formação de ondas, surgiu a necessidade de categorizar as ondas em vários tipos distintos, relacionando-os com o mecanismo de formação responsável pela sua criação. Com isto em mente, definiram-se três tipos básicos de ondas: ondas capilares, planetárias e de gravidade. As primeiras são ondas curtas e de alta frequência, criadas pela interação do vento com a superfície do oceano devido ao distúrbio causado pelo vento na mesma. A ação da gravidade sobre partículas deslocadas por este distúrbio pode provocar formação de ondas de gravidade superficiais se estas atingirem uma altura significativa para tal. Por fim, as ondas planetárias são essencialmente

formadas como consequência do efeito de Coriolis, que provocam agitação marítima devido a rotação da terra combinada com a variação da latitude e profundidade. Um aspeto que torna o estudo das ondas tão complexo, é o facto de que pode existir sobreposição de todos estes mecanismos de formação, formando ondas extremamente complexas e com um certo grau de aleatoriedade tornando complicado a sua previsão.

Dependendo do mecanismo de formação, cada onda tem um determinado comprimento de onda e período. As ondas capilares têm tipicamente períodos muito curtos (cerca de 0.1s) pois são formadas por ventos fracos ao passo que ondas criadas por tempestades (*Swell*), são ondas com períodos maiores pois são formadas por diferenças de pressão atmosféricas mais violentas. Uma vez que as ondas de maré dependem da movimentação da lua em relação à terra, o período deste tipo de ondas é entre 12 e 14 horas. Na tabela 2.1 são descritos vários tipos de ondas, seus mecanismos de formação e respetivos períodos.

Tabela 2.1: Mecanismos de formação dos vários tipos de ondas e gamas de períodos. Adaptado de Massel 1996.

Tipo de onda	Fenómeno Físico	Períodos
Ondas capilares	Tensão superficial	< 0.1 s
Ondas geradas pela ação do vento	Variação da intensidade e direção do vento e gravidade	< 15 s
Swell	Séries de ondas geradas por condições meteorológicas distantes	< 30 s
Surf beat	Combinação de ondas com alturas de rebentação diferentes	1 - 5 min
Seicha	Variação do vento e ressonância em espaços confinados	2-40 min
Tsunamis	Tremores de terra ou movimentos de placas tectónicas	10 min - 2 h
Sobreelevação do nível do mar de índole meteorológica	Variação da pressão atmosférica e das forças do vento	1 - 3 dias
Marés	Ação da força gravítica da lua ou do sol e rotação da terra	12 - 24 h

É importante ter conhecimento de todas estas ondas e mecanismos de formação, de modo a compreender quais as mais importantes para a engenharia costeira. Uma vez que a agitação marítima aparenta ser aleatória, ter o conhecimento de que tipo de onda é mais frequente e/ou contém o maior valor energético é fundamental. Estas ondas são as ondas de gravidade, pois são formadas pelo meio mais comum, o vento, e contém uma grande quantidade de energia. Na figura 2.1, ainda que não represente o valor real da energia contida em cada tipo de onda, dá uma ideia de que tipo de onda se deve ter em conta na conceção de estruturas costeiras. Conclui-se segundo o gráfico que as ondas de gravidade têm o maior conteúdo energético de todas as ondas no oceano.

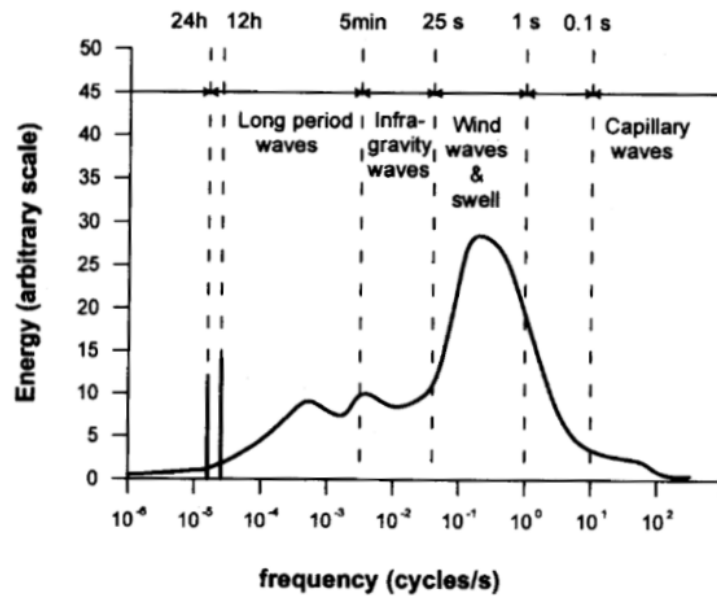


Figura 2.1: Distribuição esquemática da energia da onda por frequência. Adaptado de Massel 1996.

2.2 Teoria das ondas

Na procura de descrever matematicamente o comportamento das ondas, foram desenvolvidas várias teorias, cada uma com diferentes hipóteses, aproximações e aplicações. Assim, cada teoria consegue descrever com relativamente boa precisão um determinado tipo de onda, assumindo que as hipóteses da teoria são satisfeitas. Por isso, é de grande importância a escolha da teoria mais indicada para cada caso de estudo (Demirbilek e Vincent 2008).

2.2.1 Parâmetros que definem a onda

Uma onda pode ser representada por apenas duas variáveis: x (espacial) e t (temporal). Pode também ser representada por uma combinação destas duas: θ (a sua fase). Matematicamente, estas ondas simples podem ser descritas por funções de seno e cosseno, e estas são completamente definidas pela altura de onda, comprimento da mesma e profundidade da água na zona de propagação. Todos os restantes parâmetros que podem ser utilizados na descrição de uma onda, podem ser determinados a partir destes anteriormente referidos. Na tabela 2.2 encontram-se todos esses parâmetros principais (Dean e Dalrymple 1984).

Tabela 2.2: Parâmetros que descrevem uma onda simples. Adaptado de Cardoso 2017.

Parâmetro	Descrição
H (m)	Altura da onda
T (s)	Período
L (m)	Comprimento de onda
d (m)	Profundidade
a (m)	Amplitude
θ (rad)	Fase
k (rad/s)	Número de onda
ω (rad/s)	Frequência angular
C (m/s)	Celeridade

A Figura 2.2 mostra alguns destes parâmetros e nomenclaturas como a parte mais alta da onda (crista) assim como a mais baixa (cava). A distância na vertical entre estes dois pontos é a altura de onda (H). A amplitude é dada pela distância entre a superfície livre da água não perturbada até à crista (ou cava), ou seja, metade da altura de onda no caso das ondas lineares. O período T da onda corresponde ao tempo que decorre entre duas passagens consecutivas da cava ou da crista por um determinado ponto fixo. A distância horizontal entre dois desses pontos é o comprimento de onda, L . Os restantes parâmetros presentes na Figura 2.2 podem ser calculados através destes.

A fase é dada por $\theta = kx - \omega t$. Onde a frequência angular é dada por $\omega = 2\pi/T$, e o número de onda por $k = 2\pi/L$. A celeridade é dada por $C = L/T = \omega/k$.

Definidos estes parâmetros é possível definir a superfície livre da onda através de $\eta(x, t)$ ou por $\eta(\theta)$.

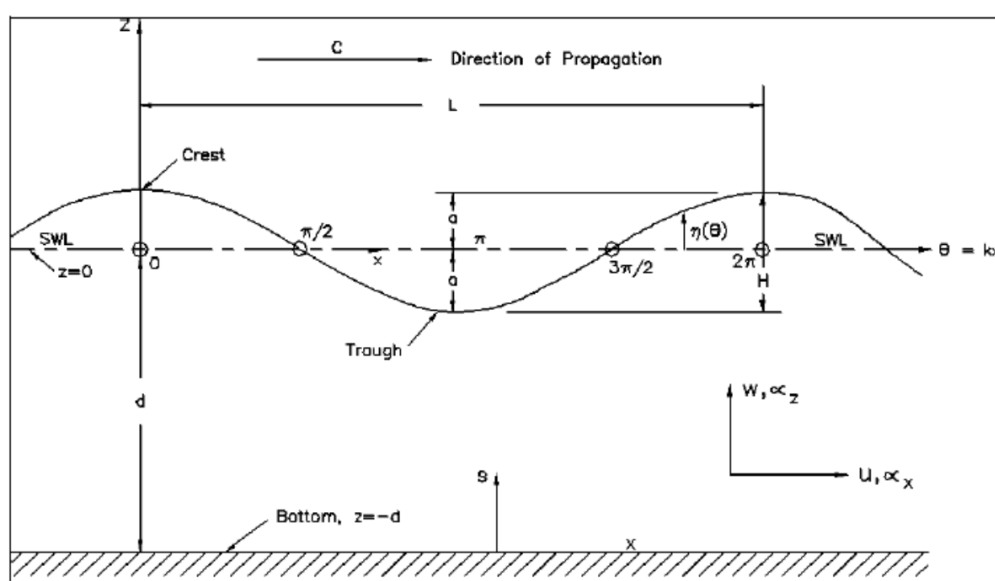


Figura 2.2: Onda simples progressiva, sinusoidal - Parâmetros de definição. Adaptado de Demirbilek e Vincent 2008 .

2.2.2 Teoria Linear de Ondas

A teoria linear de ondas foi a primeira a conseguir descrever matematicamente, ondas simples com relativamente boa precisão, apesar das suas simplificações. Desenvolvida por Airy em 1845, trata-se de uma teoria muito elementar, de fácil aplicabilidade e adequada para uma grande variedade de parâmetros de onda. É portanto uma teoria bastante popular e ainda vastamente utilizada. Apesar da sua simplicidade e utilidade para alguns casos de estudo, esta teoria apresenta algumas limitações, por vezes tornando-a inadequada para estudo de ondas mais complexas e aproximadas à realidade. Os pressupostos para a aplicação desta teoria são:

- a) O fluido deve ser homogêneo e incompressível; Massa volúmica ρ constante.
- b) A tensão superficial pode ser desprezada.
- c) O efeito de Coriolis é desprezável.
- d) A pressão na superfície livre é constante e uniforme.
- e) O fluido é ideal ou invíscido.
- f) O escoamento é irrotacional.
- g) O fundo é horizontal, fixo e impermeável.
- h) A amplitude da onda é pequena e a sua forma não varia.
- i) Ondas são bidimensionais.

De modo a compreender melhor matematicamente as simplificações desta teoria, pode ser feita uma breve descrição de como a mesma é definida. Um dos pressupostos da teoria é que o escoamento será irrotacional, isto é, apenas tem componente de velocidade longitudinal e vertical.

Utilizando o potencial de velocidade Φ , cujo gradiente é o vetor de velocidade em cada ponto, têm-se que a componente da velocidade do fluido na direção longitudinal é dada por:

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad (2.1)$$

Sendo que a componente vertical é:

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} \quad (2.2)$$

Outra suposição da teoria é a de que se trata de um escoamento bidimensional. Assim

sendo, a função corrente Ψ , que é ortogonal ao potencial de velocidade, pode ser obtida através da mesma utilizando as equações:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\partial \Psi}{\partial z} = u \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = -\frac{\partial \Psi}{\partial x} = w \quad (2.4)$$

Ao derivar estas equações obtém-se a equação de *Laplace* que descreve escoamentos bi-dimensionais e incompressíveis, como é o caso daqueles a que se aplica a teoria linear. Confirmando que a equação é satisfeita por Φ e por Ψ têm-se:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.5)$$

podendo também ser escrita como:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.6)$$

onde u e w são as componentes das velocidades em x e z respetivamente (Dean e Dalrymple 1984). De forma a completar o sistema de equações, é necessário incluir a equação de Bernoulli para um escoamento potencial não estacionário, uma vez que a forma da superfície da água não é conhecida. Considera-se pressão constante (P_η) acima da superfície livre, pois trata-se da pressão atmosférica, anulando assim o segundo termo da equação:

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{P_\eta}{\rho} + gz = 0, \quad \text{para } z = \eta(x, t) \quad (2.7)$$

A elevação da superfície livre de uma onda monocromática progressiva é então dada por:

$$\eta(x, t) = A \cos(\theta) \quad (2.8)$$

Onde $A = H/2$ e $\theta = kx - \omega t + \psi$. Resolvendo a equação de Laplace, obtém-se o seguinte potencial de velocidade:

$$\Phi = \frac{H}{2} \frac{g}{\omega} \frac{\cos(k(d+z))}{\cosh(kd)} \cos(\theta) \quad (2.9)$$

a partir deste, é possível obter as componentes da velocidade:

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\cosh(k(d+z))}{\cosh(kd)} \cos(\theta) \quad (2.10)$$

$$w = \frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{H}{2} \frac{gT}{L} \frac{\sinh(k(d+z))}{\cosh(kd)} \sin(\theta) \quad (2.11)$$

Uma vez deduzidos todos os parâmetros necessários para definir a teoria linear, pode escrever-se a relação de dispersão:

$$w^2 = gk \tanh kd \quad (2.12)$$

Através de manipulação algébrica, pode-se escrever a expressão que traduz a velocidade de propagação da onda (Celeridade):

$$C = \frac{L}{T} = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh kd} \quad (2.13)$$

Pode fazer-se o mesmo para o comprimento de onda:

$$L = \frac{gT}{\omega} \tanh kd \quad (2.14)$$

Uma dedução mais detalhada das expressões anteriores pode ser encontrada em Dean e Dalrymple 1984. Com base nos parâmetros presentes nestas expressões, categorizam-se as ondas com base na profundidade do meio em que se propagam (Tabela 2.3). Por exemplo o termo $\tanh(kd)$, onde kd está diretamente relacionado com a profundidade da água onde a onda se propaga, pode ser ou não relevante para a equação alterando completamente a sua forma.

Tabela 2.3: Caracterização das ondas consoante a profundidade a que se propagam. Adaptada de Demirbilek e Vincent 2008.

Tipo de Onda	D/L	$\tanh(kd)$	
Profundidade Infinita	1/2 a ∞	$\simeq 1$	Características independentes da profundidade
Profundidade intermédia	1/20 a 1/2	$\tanh(kd)$	Características dependentes da profundidade
Baixa Profundidade	0 a 1/20	$\simeq 1$	Velocidade de propagação depende da profundidade

Concluída a demonstração da teoria linear, pode verificar-se que, embora seja uma teoria que proporciona uma boa aproximação do movimento de ondas de baixa amplitude, não se traduz útil na aplicação a ondas existentes na natureza. Assim sendo, para o estudo de ondas mais próximas da realidade, será mais pertinente utilizar a teoria não linear de ondas para estudos de engenharia costeira, uma vez que esta lida melhor com as características mais irregulares e por vezes imprevisíveis que estas apresentam.

2.2.3 Teoria Não Linear de Ondas

Uma vez que a teoria linear de ondas se mostra insuficiente no estudo de ondas mais parecidas com as presentes na natureza, foram desenvolvidas teorias de ordem superior e mais complexas de modo a satisfazer a necessidade da realizar estudos sobre este tema. Uma dessas teorias é a teoria não linear de ondas. Esta teoria descreve com melhor precisão os fenómenos mais complexos presentes nas ondas sem ter tantas limitações como a

teoria linear. Entre estes fenómenos encontram-se o transporte de massa (chamado deriva de *Stokes*) onde existe transporte de massa na direção da propagação da onda, contrário ao que acontece na teoria anteriormente referida (Dean e Dalrymple 1984).

Existem várias abordagens da teoria não linear de ondas, formuladas de forma diferente e mais direcionadas para o estudo de uma determinada gama de ondas. No presente estudo, foi utilizada a teoria de *Stokes*. Esta é uma extensão da teoria linear onde através de uma expansão de potências pelo método de perturbações de modo a aumentar a ordem desta, chegando a ser de quinta ordem (Cardoso 2017). Na expansão, indicada pela equação 2.15, o parâmetro $\varepsilon = ka$, sendo k o número de onda e a a amplitude:

$$\Phi = \Phi_0 + \varepsilon \Phi_1 + \varepsilon^2 \Phi_2 + \dots \quad (2.15)$$

Pode verificar-se que o termo Φ_0 não depende de ε pois trata-se da forma da teoria linear. Deverá proceder-se à adimensionalização das equações de maneira a resolvê-las (Dean e Dalrymple 1984). Assim sendo, a elevação da superfície livre (equação 2.16) e as componentes da velocidades (equações 2.17 e 2.18) são dadas por:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(\theta) + k \frac{H^2}{4} \frac{3 - \sigma^2}{4\sigma^3} \cos(2\theta) \quad (2.16)$$

$$u = \frac{H}{2} \omega \frac{\cosh(kz)}{\sinh(kd)} \cos(\theta) + \frac{3}{4} \frac{H^2 \omega k \cosh(2kz)}{4 \sinh^4(kd)} \cos(2\theta) \quad (2.17)$$

$$w = \frac{H}{2} \omega \frac{\sinh(kz)}{\sinh(kd)} \sin(\theta) + \frac{3}{4} \frac{H^2 \omega k \sinh(2kz)}{4 \sinh^4(kd)} \sin(2\theta) \quad (2.18)$$

onde H representa a altura de onda de primeira ordem ($H = 2a$), θ a fase ($\theta = kx - \omega t + \psi$) e $\sigma = \tanh(kd)$. Em ondas de ordem mais elevada, surgem componentes harmónicas que são duas, três, etc. vezes a frequência fundamental. Estas harmónicas sobrepõem-se à componente fundamental prevista na teoria linear. Por esta razão esta teoria é capaz de descrever o transporte de massa.

2.3 Ondas Bicromáticas

Como referido anteriormente, as ondas presentes nos casos de estudo são ondas bicromáticas. Estas ondas resultam da combinação de duas ondas monocromáticas, criando ondas com duas componentes que podem mover-se com diferentes velocidades, comprimentos de onda e amplitudes.

Matematicamente a superfície livre destas ondas rege-se pela soma das componentes individuais de cada onda monocromática que a constitui. Assim, assumindo duas ondas monocromáticas com períodos T_1 e T_2 , comprimentos de onda L_1 e L_2 e amplitudes H_1 e H_2 , tem-se, segundo a teoria linear de ondas, a equação para a superfície livre de cada onda monocromática:

$$\eta_1 = \frac{H_1}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{L_1} - \frac{2\pi t}{T_1}\right) \quad \text{e} \quad \eta_2 = \frac{H_2}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{L_2} - \frac{2\pi t}{T_2}\right) \quad (2.19)$$

sendo a equação para a onda bicromática simplesmente:

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 \quad (2.20)$$

Na presente dissertação, as ondas monocromáticas que compõem a onda bicromática em estudo têm a mesma altura de onda e períodos distintos. Quando é esse o caso, acontece que as ondas acabam por sobrepor os seus máximos e mínimos periodicamente, isto é, a onda bicromática adquire um comportamento periódico característico que pode ser observado na figura 2.3. Neste caso, duas ondas com mesma altura de onda (0.05m) e diferentes períodos (T_1 e T_2). É possível verificar o que foi dito anteriormente pois existem instantes em que as ondas se anula e outras em que se somam criando momentaneamente uma onda com o dobro da altura. Aplicando a equação 2.20, a equação da superfície livre do envelope é dada por:

$$\eta_{envelope} = \pm H \cos\left[\pi\left(\frac{L_2 - L_1}{L_1 L_2}\right)x - \pi\left(\frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2}\right)t\right] \quad (2.21)$$

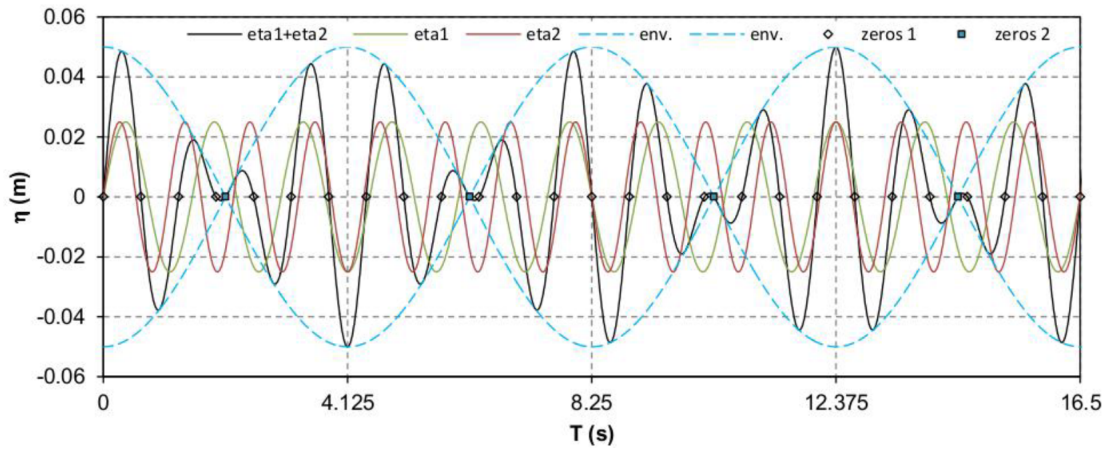


Figura 2.3: Perfil de onda bicromática (a preto), constituída pela adição de duas ondas monocromáticas lineares com a mesma altura (a vermelho e verde), e envelope (linha tracejada azul). Adaptado de Conde et al. 2013 .

2.4 Ondas Irregulares

Como dito anteriormente, as ondas presentes na natureza são sobreposições de imensas ondas de origens diferentes, tornando a superfície da água dos oceanos, irregular, imprevisível e até quase aleatória. Como resposta a este acontecimento, para o seu estudo, é necessário reajustar o tratamento das suas características em termos estatísticos. Ao agrupar as ondas por origem e frequência, é possível fazer uma análise espectral das mesmas

de modo a realizar o estudo pretendido. Apesar de ondas monocromáticas serem quase inexistentes na natureza, o conhecimento que estas nos podem trazer ao ser estudadas em laboratório pode ser útil na análise de ondas irregulares.

MODELO NUMÉRICO

Neste capítulo serão descritas todas as ferramentas computacionais utilizadas na modelação do problema proposto, assim como as suas simulações. Ao longo das secções deste capítulo serão explicados em maior detalhe os aspetos do *software* utilizado e a que ferramentas e *utilities* do mesmo se deu preferência. Como já foi referido o programa escolhido para esta dissertação foi o *software open-source* OpenFOAM, com o qual se modelou e simulou todos os casos aqui presentes, utilizando para isso o solver adicional OlaFLOW.

3.1 Ferramentas computacionais

A versão do OpenFOAM utilizada nesta dissertação foi a 1712 instalada no sistema operativo UBUNTU 16.04 LTS. As simulações deste estudo foram realizadas num computador com um processador Intel®Core™ i7 – 7700K @ 3.3GHz × 8 com 32GB de RAM.

3.1.1 OpenFOAM

O OpenFOAM (*Open Field Operation and Manipulation*) é um *software open-source* criado pela OpenFOAM Foundation (Foundation 2019) com o objetivo de resolver problemas de CFD. O facto de ser *open-source* significa que o programa se encontra sob os termos da *General Public License* que permite a qualquer utilizador utilizar, modificar e redistribuir o *software* dentro de certos termos (OpenFOAM 2019). Algo que distingue o OpenFOAM de outros programas de objetivos semelhantes, é a liberdade pela parte do utilizador, de modificar vários ficheiros de código escrito em C++ (*scripts*) já presentes no programa de modo a escolher de forma completamente autónoma, os parâmetros que desejar para a sua simulação. Estes *scripts* encontram-se agrupados numa vasta biblioteca que contém diversos casos para variadas aplicações para estudos de ciência e engenharia.

Dentro destas aplicações, existem parâmetros mais ou menos adequados ao caso de estudo pretendido e cabe ao utilizador o que mais se aproxima do seu, de modo a poder alterar os seus *scripts* com a finalidade de a adaptar à sua necessidade. Dentro de cada aplicação existem também ficheiros preparados para a geração de malha, posicionamento de sondas e ferramentas de pós processamento, no entanto, este último necessita de *software* complementar para ser visualizado uma vez que o OpenFOAM não possui interface gráfica. Os programas utilizados para este fim foram o *Paraview* (ParaView 2019), que possibilita a visualização gráfica da malha e das ondas uma vez formadas, e o *Gnuplot* que permite a criação de gráficos utilizando as sondas previamente colocadas.

Como se pode verificar na figura 3.1, a estrutura do programa divide-se em pré-processamento, resolução e pós-processamento, sendo o *Paraview* um dos principais complementos deste último.

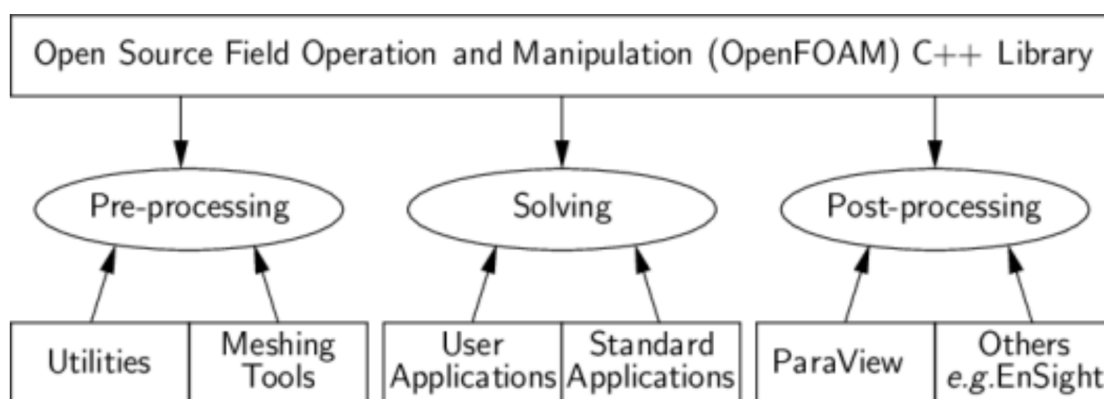


Figura 3.1: Estrutura de funcionamento do algoritmo do OpenFOAM identificando os três passos principais (OpenFOAM® (2013)).

A estrutura de um caso de estudo no OpenFOAM tem de respeitar uma certa estrutura de diretorias, cada uma contendo as informações para a simulação no seu devido lugar. No anexo I encontra-se uma árvore de exemplo da organização de pastas de um caso de estudo com os respetivos nomes.

Resumindo, o programa necessita de três diretorias dentro da diretoria principal, sendo essas a pasta "0", a pasta "*system*" e a pasta "*constant*":

- Pasta "0": Esta pasta representa o conjunto de condições iniciais impostas ao problema em termos de velocidade, pressão, estado inicial do fluido etc.
- Pasta "*system*": Nesta pasta estão contidas todas as informações referentes aos esquemas numéricos da simulação, assim como os passos de tempo de escrita e o tempo total de simulação pretendido. É também nesta diretoria que se especificam os algoritmos a usar, que malha base criar através de *scripts* de geração de malha e que malha pretendemos formar a partir desta através de ficheiros stl.

- Pasta "*constant*": Nesta diretoria encontram-se as propriedades da onda a gerar, os modelos de turbulência que serão considerados e a definição da direção e intensidade da força gravítica. Para além disso, contém duas sub-diretorias, "*polyMesh*" e "*triSurface*" que guardam a informação sobre a malha e suas condições fronteira e os ficheiros utilizados para a gerar.

3.1.2 olaFlow

O *solver* utilizado para a realização deste estudo foi o olaFlow. Este é um *add-on* que se pode instalar por cima do OpenFOAM para expandir as suas funcionalidades e adaptar o seu poder de simulação a um determinado estudo. Este *solver* tem como base um outro já existente no OpenFOAM, o *interFoam*, e utiliza o mesmo algoritmo de resolução acrescentado de diferentes bibliotecas de funcionalidades e dicionários diferentes de modo a ser mais versátil na definição de condições fronteira para estudos de ondas e geração das mesmas. No caso da presente dissertação, o olaFlow é especialmente útil pela possibilidade de gerar ondas irregulares de forma muito fácil e intuitiva. Assim sendo, esta ferramenta foi imprescindível na geração das ondas bicromáticas do presente estudo. Uma leitura mais alargada no tema pode encontrar-se em Higuera 2015.

3.1.3 Geração de Malha

Todas as malhas utilizadas nesta dissertação foram criadas utilizando duas *utilities* do OpenFOAM: o *blockMesh* e o *snappyHexMesh*.

O *blockMesh* é uma funcionalidade do OpenFOAM que permite a criação de blocos de malha tridimensionais, existindo a possibilidade de especificar o número de elementos desejados em qualquer uma das três direções espaciais assim como criar expansões de malha que permitem a diminuição do tamanho dos elementos em determinada direção. Esta *utility* é muito útil para uma inicial criação da malha, uma vez que é ideal para definir o grau geral de refinamento com que a malha final ficará. No entanto, o *blockMesh*, estando limitado a criação de blocos hexaédricos, não é ideal para a geração de malhas mais complexas. Assim sendo, foi usado como complemento, a funcionalidade *snappyHexMesh*, que permite utilizar um ficheiro STL criado por um *software* externo à escolha do utilizador (neste caso utilizou-se o *SolidWorks*), para modelar a malha até à forma pretendida. Esta ferramenta utiliza uma malha pré-gerada pelo *blockMesh* para criar a nova malha com a forma desejada, utilizando ficheiros STL previamente colocados na diretoria "*triSurface*" (Anexo I).

3.1.4 Objetos Função

O OpenFOAM dispõe de funcionalidades (*Function Objects*) para diversas aplicações durante o decorrer das simulações. A principal funcionalidade utilizada nesta dissertação foi a de *probes*. Esta permite a medição de diversos parâmetros num determinado local

da malha, seja este fixo ou móvel. Para a análise de ondas, um parâmetro fundamental a obter é a localização da superfície livre ao longo do tempo. Assim sendo, utilizou-se a função *probes*. Esta função, definida no ficheiro de "*controlDict*" permite o posicionamento de linhas divididas em segmentos cujo número é definido pelo utilizador, que atribui a cada um desses segmentos um valor que distingue as duas fases do fluido (0 para o ar e 1 para a água). A partir destes dados que são guardados para todos os passos de tempo que o utilizador decidir registar (também definido do ficheiro "*controlDict*") é possível o seu tratamento e conseguir gráficos com a informação da superfície livre ao longo do tempo e em cada posição de sondas. Este tratamento é feito através de uma rotina *python* que faz um integral na zona de transição de fases (entre o ar e a água) de modo a determinar com precisão onde se encontra a superfície.

3.1.5 Pós-processamento

Como foi referido anteriormente, o OpenFOAM não possui ambiente gráfico, sendo necessário recorrer a outras aplicações de modo a tratar os dados obtidos. Os *softwares* utilizados neste tratamento foram o *Gnuplot*, o *Paraview* e o *python*.

- *Paraview*: O *Paraview* é um programa bastante útil neste tipo de estudos pois torna possível a visualização de malhas, o estado da simulação etc. Uma vez que o OpenFOAM não possui ambiente gráfico, este *software* torna-se extremamente útil para verificação do refinamento das malhas criadas, assim como visualização das ondas em si.
- *Python*: Linguagem de programação de alto nível, orientada por objetos e direcionada para proporcionar aos utilizadores uma programação lógica e clara para grandes e pequenos projetos. É também extremamente versátil e completa, sendo uma excelente ajuda no tratamento de dados e manipulação algébrica. Isto combinado com o facto de que existem compiladores gratuitos para todos os principais sistemas operativos, fez do *python* uma mais valia para a presente dissertação no que toca a tratamento de dados. Foram criadas várias rotinas com o propósito de agrupar e transformar a informação gerada pelas funções objeto do OpenFOAM de modo a poderem ser visualizadas e interpretadas.

Com o objetivo de observar a superfície livre das ondas, foi criado um *script* chamado "*postSensVOF.py*" (Anexo I) que interpreta e compila num ficheiro, a informação gerada pelas sondas. Como referido anteriormente, este *script* realiza um integral de Riemann da fração de volume ao longo da altura para cada instante, guardando, para cada sonda, um ficheiro com a posição da superfície livre em função do instante de tempo (Cardoso 2017).

Para a análise espectral será necessário calcular transformadas de *Fourier*, para tal criou-se um *script* com o nome d "*FFT.py*" (Anexo I) que faz uma transformada rápida de *Fourier* (FFT), que já existe como função do *python*.

- *Gnuplot*: Este programa posteriormente instalado no sistema operativo *Ubuntu*, foi utilizado para criação de diversos gráficos. É um *software* gratuito que permite liberdade de programação na perspetiva do utilizador uma vez que existem numerosas opções para escolher em termos de apresentação e organização dos dados. No caso da superfície livre, o *Gnuplot* interpreta o ficheiro criado pelo *python* de modo a poder gerar o respetivo gráfico.

3.2 Modelação Matemática e Numérica

Para o estudo de fenómenos físicos, é necessário recorrer a equações matemáticas, e, a mecânica dos fluidos não é exceção. Esta é regida por Equações Diferenciais às Derivadas Parciais (EDP) e, para serem resolvidas através da simulação computacional, é necessária a aplicação de métodos já existentes. Existem vários métodos para este propósito como por exemplo: diferenças finitas, elementos finitos e métodos espectrais. No entanto, nesta tese, foi utilizado o método mais aplicado em CFD, o Método dos Volumes Finitos (MVF) através do OpenFOAM.

O MVF consiste na divisão do domínio em volumes de controlo menores através de uma malha, e utilizando o centróide de cada um deles para guardar os valores das variáveis e constantes correspondentes ao respetivo volume finito. As equações que governam o escoamento são integradas em todas as células do domínio e o transporte de informação entre volumes é feita através da interpolação a partir dos seus centróides (Cardoso 2017).

3.2.1 Equações RANS

Como descrito anteriormente, as equações de *Navier-Stokes* regem os escoamentos tridimensionais, incompressíveis e newtonianos. Estas equações são ideais para a representação de escoamentos relativamente simples e de escoamento maioritariamente laminar. No entanto, na grande maioria dos estudos de engenharia costeira, os escoamentos presentes são turbulentos. De modo a integrar turbulência criaram-se as equações denominadas por *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS).

Assim sendo, ao aplicar a conservação de massa a um volume de controlo obtém-se:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

O que pode ser simplificado considerando o que o vetor $\mathbf{u} = (u, v, w)$ e que o fluido é incompressível, obtendo-se:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3.2)$$

Ou, em notação de Einstein:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.3)$$

A lei da conservação do momento ou da quantidade de movimento é dada na mesma notação por:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p \delta_{ij}}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3.4)$$

onde g representa a aceleração da gravidade, δ o delta de Kronecker e μ a viscosidade dinâmica do fluido. O regime turbulento é ainda influenciado pelo número de Reynolds, que relaciona as forças de inércia com as forças viscosas. O número de Reynolds é dado por:

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (3.5)$$

Onde U é a velocidade do fluido, L é o comprimento característico que depende da geometria do escoamento e μ é o coeficiente de viscosidade do fluido. O número de Reynolds é também indicador do regime em que se encontra o escoamento. Por exemplo, para valores abaixo de um valor crítico ($Re < 2100$ dentro de tubos), o escoamento encontra-se em regime laminar, para valores superiores ($Re > 4000$ no interior de tubos) encontra-se em regime turbulento.

O regime turbulento caracteriza-se pela sua imprevisibilidade, movimento caótico e criação de vórtices de diversos tamanhos e em diversas direções. Assim sendo, a variação da velocidade e pressão em diversos pontos do escoamento torna-se igualmente imprevisível. Nesta situação, é prudente proceder a uma medição pontual da velocidade (como é mostrado na Figura 3.2) uma vez que esta varia aleatoriamente ao longo do tempo.

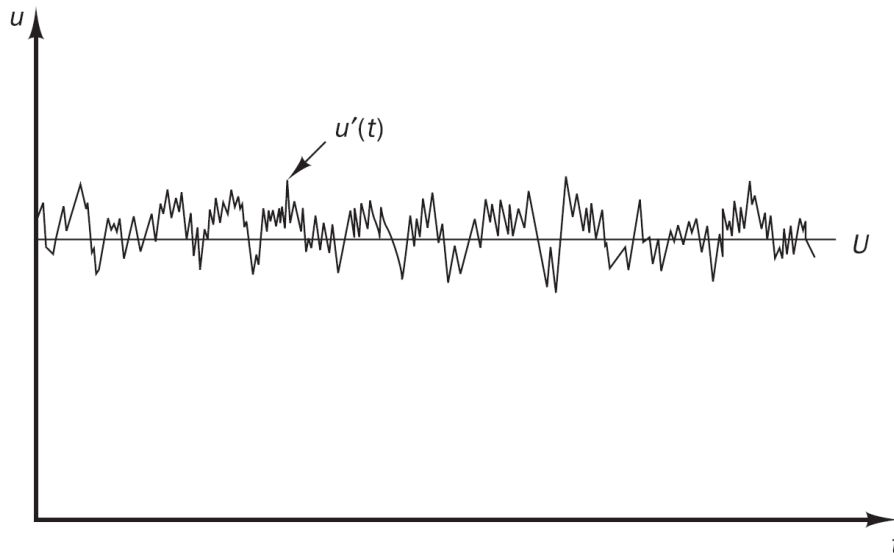


Figura 3.2: Medição pontual típica da velocidade num escoamento turbulento. Adaptado de (Versteeg e Malalasekera 2007).

Devido a esta imprevisibilidade, é necessário utilizar outros métodos para a representação e cálculo das características do escoamento. Estas são decompostas na sua forma de

média e flutuação. Por exemplo, considere-se uma propriedade do escoamento a , esta seria representada como $a(t) = \bar{a} + a'(t)$, onde \bar{a} representa a média temporal e a' a flutuação da respectiva propriedade. Este método chama-se decomposição de Reynolds e é com ele que se obtêm as equações necessárias para o tratamento de escoamentos turbulentos, as chamadas RANS.

Se a média temporal for aplicada à equação da conservação de massa, esta não se altera uma vez que a média da flutuação da velocidade é nula. Assim sendo:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.6)$$

Já na equação da conservação do movimento, as flutuações têm influência, ficando:

$$u_i u_j = (\bar{u}_i + u'_i)(\bar{u}_j + u'_j) = \overline{(\bar{u}_i \bar{u}_j)} + \overline{(\bar{u}_i u'_j)} + \overline{(u'_i \bar{u}_j)} + \overline{(u'_i u'_j)} = \bar{u}_i \bar{u}_j + \overline{u'_i u'_j} \quad (3.7)$$

E, ao aplicar a decomposição de Reynolds à equação de momento fica:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{\rho u'_i u'_j}}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (3.8)$$

O novo termo que aparece na equação ($\overline{\rho u'_i u'_j}$), é uma contribuição da turbulência uma vez que depende das flutuações da velocidade (u'_i). Os termos de flutuações terão ainda de ser modelados, uma vez que não é possível resolver estas equações através das equações RANS. Para tal, recorre-se a modelos de turbulência de modo a reorganizar as mesmas, isolando o termo turbulento do lado direito da equação:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right] \quad (3.9)$$

Este lado direito da equação corresponde à contribuição da turbulência e dá origem a seis incógnitas adicionais denominadas de tensões de Reynolds. Os modelos de turbulência que existem são classificados quanto ao número de equações adicionais a serem resolvidas paralelamente às RANS. Sendo a turbulência um aspeto tão importante a considerar nos cálculos destes escoamentos pela sua dissipação de energia, é costume adicionar-se um fator de viscosidade adicional dado por:

$$\overline{u'_i u'_j} = -\nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (3.10)$$

Esta viscosidade é denominada de viscosidade turbulenta e, adicionada à molecular, resulta a viscosidade efetiva: $\mu_{eff} = \mu + \rho \nu_t = \mu + \nu_t$. Assim sendo, a equação da quantidade de movimento fica:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u'_i u'_j} \right] + F_i \quad (3.11)$$

onde F_i representa as forças externas.

3.2.2 Modelos de Turbulência

A escolha do modelo de turbulência é de grande importância no decorrer de um estudo, uma vez que tem impacto não só nos resultados, mas também no tempo de computação. Existem diversos modelos, cada um mais adequado para uma determinada situação, sendo necessário alguma pesquisa para a sua seleção. A técnica mais rigorosa é a *Direct Numerical Simulation* (DNS) que, ao resolver diretamente as equações de Navier-Stokes necessita de uma malha extremamente refinada para captar os vórtices de menor dimensão, o que aumenta imenso o tempo de simulação. Outra técnica, chamada *Large Eddy Simulation* (LES), que resolve as equações para casos de vórtices maiores, sendo o cálculo dos mais pequenos feito de forma modelada, reduzindo o esforço computacional. Neste estudo foi utilizado o modelo de turbulência $k - \epsilon$ aplicado às RANS. É um modelo adequado a gradientes de pressão pequenos e onde prevalecem as tensões de corte de Reynolds. Para aplicação do modelo adicionam-se duas equações, k , que representa a energia cinética turbulenta:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla k - \nabla \cdot (D_k \nabla k) + \beta_k k = F_k \quad (3.12)$$

e ϵ , que representa a taxa de dissipação de energia:

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \epsilon - \nabla \cdot (D_\epsilon \nabla \epsilon) + \beta_\epsilon k = F_\epsilon \quad (3.13)$$

Tabela 3.1: Expressões intermédias para o modelo de turbulência $k - \epsilon$. Adaptado de Cardoso 2017.

Coeficientes	Expressões Intermédias
Coeficientes de Difusão	$D_k = \nu + \frac{x_t}{\sigma_k}$ $D_\epsilon = \nu + \frac{x_t}{\sigma_\epsilon}$
Coeficientes de Dissipação	$B_k = \frac{\epsilon}{k}$ $B_\epsilon = C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon}{k}$
Termos Fonte	$F_k = 2\nu_t S^2$ $F_\epsilon = 2C_{\epsilon 1} \nu_t \frac{\epsilon}{k} S^2$

Na tabela 3.1 encontram-se as expressões intermédias para o modelo $k - \epsilon$, onde os termos D_k e D_ϵ são os coeficiente de difusão, β_k e β_ϵ são coeficientes de dissipação e F_k e F_ϵ são os termos fonte que incluem o tensor de deformações S dado por:

$$S = \left[\frac{\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^t}{2} \right] \quad (3.14)$$

Para além disso, existem coeficientes para as equações de transporte, calculados empiricamente que completam o modelo. Estes estão apresentados na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Coeficientes do modelo de turbulência $k - \epsilon$.

Modelo	C_μ	$C_{\epsilon 1}$	$C_{\epsilon 2}$	σ_k	σ_ϵ
$k - \epsilon$	0.09	1.44	1.92	1.00	1.30

3.2.3 Método VOF

Na presente dissertação, o escoamento em estudo é multifásico, ou seja existem dois fluidos imiscíveis presentes criando uma interface entre os dois denominada de superfície livre. Para modelar esta numericamente, foi utilizado o método *Volume of Fluid* (VOF) (Hirt e Nichols 1981). Este método procura estimar a localização da superfície livre ao atribuir um valor α a cada elemento do domínio com a seguinte correspondência:

$$x = \begin{cases} \alpha = 1, & \text{água} \\ 0 < \alpha < 1, & \text{interface ar-água} \\ \alpha = 0, & \text{ar} \end{cases} \quad (3.15)$$

Este é um dos métodos mais simples para a representação e modelação da superfície livre pela sua fácil adaptação a geometrias complexas. Para a determinação do número a atribuir a cada célula da malha, o método utiliza uma equação de transporte adicional. No presente caso, uma vez que se trata de um estudo de ondas onde os únicos fluidos envolvidos são a água e o ar, a equação tem o seguinte aspeto:

$$\phi = \alpha a_{agua} + (1 - \alpha) a_{ar} \quad (3.16)$$

Onde a_{agua} e a_{ar} representam, respetivamente, uma propriedade de cada um dos fluidos. O movimento das fases é então traduzido pela equação:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{u}) = 0 \quad (3.17)$$

onde \mathbf{u} é a velocidade do fluido. Uma vez que este método utiliza valores entre 0 e 1 para a definição da superfície livre, é importante a zona da mesma em repouso seja uma linha horizontal de modo a evitar quaisquer "degraus" na superfície, evitando assim qualquer possível propagação de erros (Higuera 2015).

3.2.4 Equações que governam o escoamento

O *olaFlow*, o *solver* utilizado, resolve as equações RANS para o caso de estudo que é tridimensional e de malha estática. A equação da conservação da quantidade de movimento fica:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \mathbf{U}) = -\nabla p^* - g \cdot X \nabla \rho + \nabla \mathbf{U} \cdot \nabla \mu_{eff} + \sigma \kappa \nabla \alpha \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{U} \alpha + \nabla \cdot \mathbf{U}_c \alpha (1 - \alpha) = 0 \quad (3.19)$$

Onde \mathbf{U} é a velocidade do fluido, ρ a massa volúmica, p^* a pressão modificada (que consiste na pressão ao qual se subtrai a pressão hidrostática), \mathbf{X} é o vetor posição, \mathbf{g} é a aceleração da gravidade e u_c representa a velocidade de compressão. O último termo da equação 3.18 está relacionado com a tensão superficial do fluido, representado pelo coeficiente σ , e com a curvatura da interface k dado por:

$$\kappa = \nabla \cdot \frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \quad (3.20)$$

onde α é o indicador de fase. Por fim, a viscosidade efetiva, μ_{eff} que tem em conta a viscosidade molecular e os efeitos turbulentos é dada por:

$$\mu_{eff} = \mu + \rho \nu_{turb} \quad (3.21)$$

onde ν_{turb} representa a viscosidade proveniente dos efeitos turbulentos.

3.2.5 Algoritmos de Resolução

A discretização das equações RANS demonstram que existe uma dependência linear da pressão com a velocidade e vice-versa. Esta dependência pode ser contornada com a utilização de algoritmos iterativos de modo a resolver paralelamente as equações do momento e da conservação da massa. Estes algoritmos baseiam-se em valores previstos iniciais e corretores dos mesmos.

O *olaFlow* utiliza o algoritmo PIMPLE, que é uma combinação entre os algoritmos PISO e SIMPLE, que utiliza a estrutura do primeiro adicionando relaxamento de modo a obter convergência para cada passo de tempo.

Na figura 3.3 está representado o fluxograma do algoritmo, estando a sombreado o ciclo principal, e, abaixo desse o subciclo alfa. Este é responsável por resolver a equação de fração de volume do fluido.

Alguns dos parâmetros dos algoritmos necessitam de ser previamente definidos pelo utilizador. Neste caso são seis parâmetros:

- *nCorrectors*: Parâmetro que define o número de vezes que o algoritmo resolve a equação de pressão e a correção do momento em cada passo de tempo.
- *nNonOrthogonalCorrectors*: Este corrige os resultados de malhas não ortogonais, de modo a melhorar a convergência.
- *nOuterCorrectors*: Responsável por definir o número de vezes que o sistema é resolvido por cada passo de tempo. Regra geral, quando se quer usar o algoritmo PISO, atribui-se a este parâmetro o valor de 1, pelo que no caso de se querer utilizar o PIMPLE, será necessário um valor superior a 1.
- *momentumPredictor*: Controla se cada passo de tempo se inicia (ou não) pela resolução da equação do momento, sendo este utilizado (nesta dissertação) como não ativo.
- *nAlphaSubCycles*: Este controla o número de vezes que a equação de transporte do método VOF é resolvida em cada passo de tempo.
- *nAlphacorr*: Especifica o número de correções a executar na equação do método VOF a cada iteração.

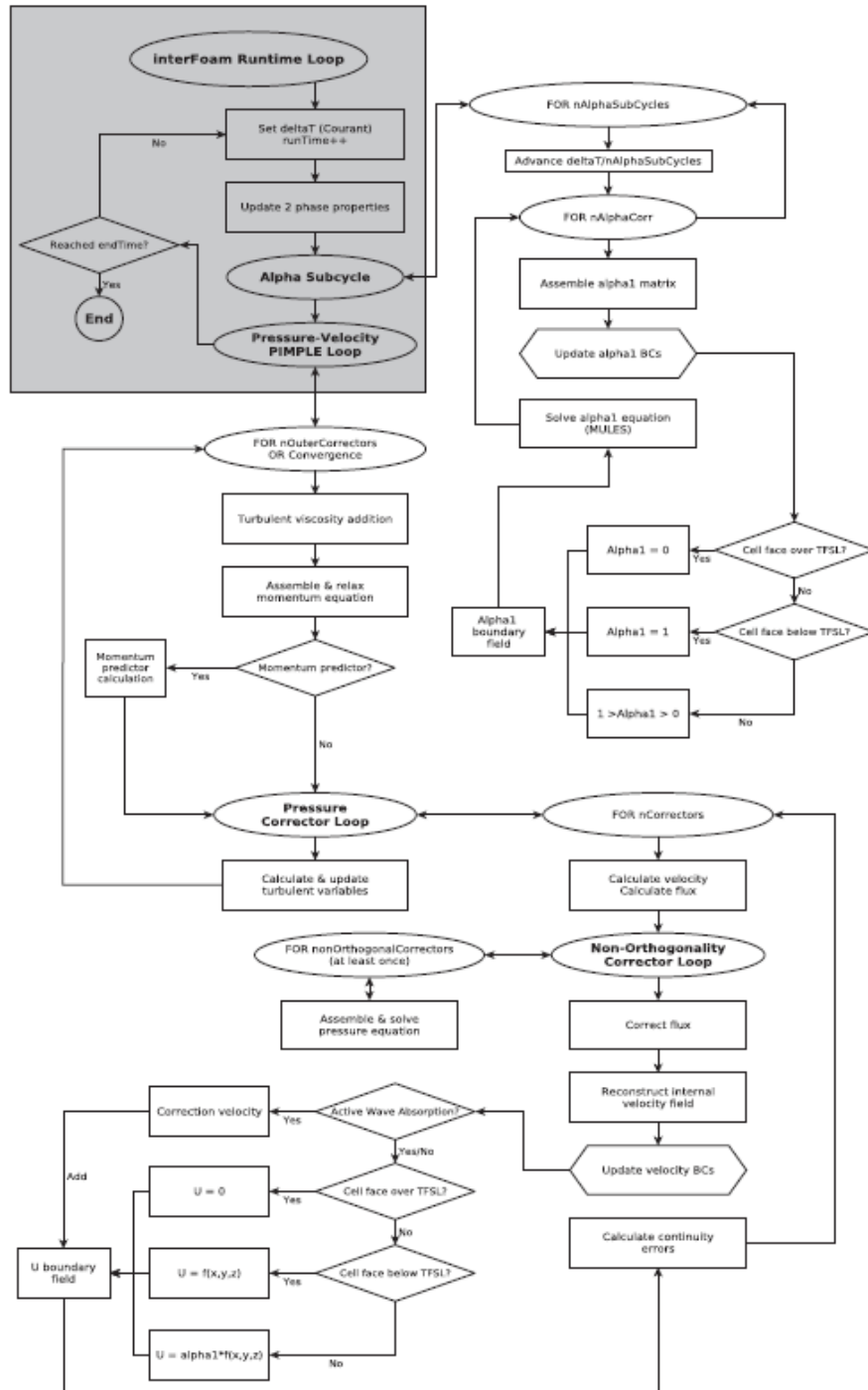


Figura 3.3: Fluxograma representativo do algoritmo PIMPLE aplicado ao solver *olaFlow*. "TFSL" representa o nível teórico de superfície livre. (Higuera et al.2012).

Estes parâmetros que permitem definir o algoritmo e a os valores correspondentes estão presentes na tabela 3.3.

Os processos do algoritmo resolvem sistemas de equações discretizadas. Para tal, recorre a diversos métodos numéricos chamados de *linear-solvers*. Não confundir com *solver* que representa todo o conjunto de ferramentas de cálculo de um problema em

Tabela 3.3: Parâmetros de controlo do algoritmo PIMPLE.

Parâmetros	Valor
<i>nCorrectors</i>	3
<i>nNonOrthogonalCorrectors</i>	0
<i>momentumPredictor</i>	Não
<i>nAlphaSubCycles</i>	2
<i>nAlphacorr</i>	1

questão, incluindo os próprios algoritmos.

Tal como se percebe no fluxograma, os *linear-solvers* são processos iterativos, baseando a quantidade de iterações nos resíduos no final de cada uma delas. Estes resíduos representam o erro cometido no cálculo e é algo que pode ser ajustado pelo utilizador de modo a ter a precisão necessária no seu estudo. Assim sendo, cada iteração pára apenas quando um dos seguintes parâmetros é verdadeiro:

- Os resíduos caírem abaixo do valor de tolerância;
- Ou o rácio entre resíduo atual e inicial cair abaixo da tolerância relativa;
- Ou o número de iterações exceder o número máximo.

Para além dos resíduos, existe também um parâmetro chamado tolerância relativa que restringe a evolução relativa da solução inicial para a final, a cada iteração. Esta costuma ser 0 em problemas não - estacionários, como é o caso do presente estudo, de modo a obrigar a solução a convergir em cada passo de tempo.

Na tabela 3.4 estão discriminados os *linear-solvers* utilizados pelo *olaFlow* para o caso de estudo. Estes foram baseados em tutoriais integrados no *olaFlow* que têm como objetivo estudos semelhantes.

Tabela 3.4: Linear-solvers (escolhidos no *olaFlow*) utilizados pelo OpenFOAM ao longo da presente dissertação.

<i>p-rgh</i>	Linear-Solver	Pré-conditioner	Tolerance	Rel. Tolerance
	<i>Preconditioned Conjugate Gradient (PCG)</i>	<i>Diagonal Incomplete-Cholesky (DIC)</i>	1×10^{-7}	0.05
u	Linear-Solver	smoother	Tolerance	Rel. Tolerance
	<i>smoothSolver</i>	<i>symGaussSeidel</i>	1×10^{-6}	0
κ, ϵ	Linear-Solver	smoother	Tolerance	Rel. Tolerance
	<i>smoothSolver</i>	<i>symGaussSeidel</i>	1×10^{-8}	0

3.2.6 Esquemas numéricos e de interpolação

De modo a ser possível aplicar os algoritmos às equações que governam o escoamento, estas têm de ser discretizadas para cada volume de controlo. Para este fim, o OpenFOAM utiliza esquemas numéricos de discretização com base na sua categoria. As categorias presentes no OpenFOAM são:

- *interpolationSchemes*: Interpolação de valores ponto a ponto;
- *snGradSchemes*: Componente do gradiente normal à face de uma célula;
- *gradSchemes*: Gradiente (∇);
- *divSchemes*: Divergência ($\nabla \cdot$);
- *laplacianSchemes*: Laplaciano (∇^2);
- *timeSchemes*: primeira e segunda derivadas temporais ($-\partial/\partial t$ e $\partial^2/\partial^2 t$).

É necessário também escolher os esquemas de interpolação. Existem vários esquemas possíveis como de primeira e segunda ordem e limitados ou ilimitados. Os esquemas utilizados foram também escolhidos com base em casos existentes no *solver olaFlow* para objetivos semelhantes ao desta dissertação. Os esquemas encontram-se discriminados na tabela 3.5:

Tabela 3.5: Esquemas numéricos e respetivos esquemas de interpolação utilizados no OpenFOAM.

<i>ddtSchemes</i> (derivada temporal $\partial/\partial t$)			
Termo	Discretização	Descrição do esquema	
Default	Euler	Limitado, implícito	

<i>gradSchemes</i> (termos gradiente ∇)			
Termo	Discretização	Interpolação	Descrição do esquema
Default	Gauss	Linear	Segunda ordem, interpolação linear

divSchemes (termos divergente $\nabla \cdot$ ou <i>div</i>)			
Termo	Discretização	Interpolação	Descrição do esquema
div(rhoPhi,U) div((rhoPhi interpolate (porosity)),U) div(rhoPhiPor,UPor) div(rhoPhi,UPor) div(rhoPhiPor,U)	Gauss	limitedLinearV 1	Primeira ordem, limitado
div(U) div((muEff*dev(T (grad(U))))))	Gauss	linear	Segunda ordem, interpolação linear
div(phi,alpha)	Gauss	vanLeer	Primeira ordem, limitado
div(phirb,alpha)	Gauss	interfaceCompression	Primeira ordem, limitado
div(phi,k) div(phi,epsilon) div((phi interpolate (porosity)),k) div((phi interpolate (porosity)),epsilon) div(phi,omega) div((phi interpolate (porosity)),omega)	Gauss	upwind	Primeira ordem, limitado
laplacianSchemes (laplaciano ∇^2)			
Termo	Discretização	Interpolação	Descrição do esquema
Default	Gauss	linear corrected	Segunda ordem, não limitado, conservativo
interpolationSchemes (Componente do gradiente normal à face de uma célula)			
Termo	Discretização	Descrição do esquema	
Default	Linear	Interpolação linear	
snGradSchemes (Componente do gradiente normal à face de uma célula)			
Termo	Discretização	Descrição do esquema	
Default	Corrected	Segunda ordem, não limitado, conservativo, correção não ortogonal	

CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Este capítulo contém uma breve introdução das condições dos ensaios numéricos, explicando todos os parâmetros necessários para a sua compreensão e posterior recriação. É também descrita toda a montagem experimental que foi realizada na produção dos respectivos resultados experimentais, os quais serão comparados e analisados mais para o final deste capítulo.

4.1 Caracterização Experimental

Antes da descrição detalhada dos resultados obtidos através das simulações que compõem esta dissertação, é necessário descrever os resultados experimentais com os quais estes serão comparados de modo a validar o código do OpenFoam para este tipo de estudos. As simulações realizadas no decorrer desta dissertação foram baseadas nos ensaios realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), mais concretamente, nos ensaios realizados sobre propagação e rebentação de ondas bicromáticas (Conde et al,(2012)).

É possível ver na figura 4.1 o canal em que foram efetuados estes ensaios e na figura 4.2 encontra-se um esquema geral das suas dimensões. Trata-se de um canal projetado para este tipo de estudo de ondas, onde existem rampas após o gerador de ondas e um estreitamento do canal. Este tipo de forma permite estudar o comportamento das ondas ao propagarem-se pelo canal até atingirem o fim do mesmo. Com o fim de obter dados relevantes para o estudo, são colocadas sondas ao longo do canal com o objetivo de recolher informação no local da mesma, seja de velocidade seja de elevação de superfície livre em cada instante. Na figura 4.3 podemos ver as sondas utilizadas no canal físico.

O caso estudado é uma onda bicromática resultante da combinação de duas ondas monocromáticas, ambas com a altura de 0.08m e períodos de 1.1 e 1.5s. A propagação

CAPÍTULO 4. CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

da onda no canal será simulada no *software OpenFoam* utilizando o *solver olaFlow* como descrito anteriormente.



Figura 4.1: Vista lateral do canal (esquerda), gerador de ondas (centro) e vista de cima do canal (direita). Adaptado de Conde et al. 2013 (2013b)

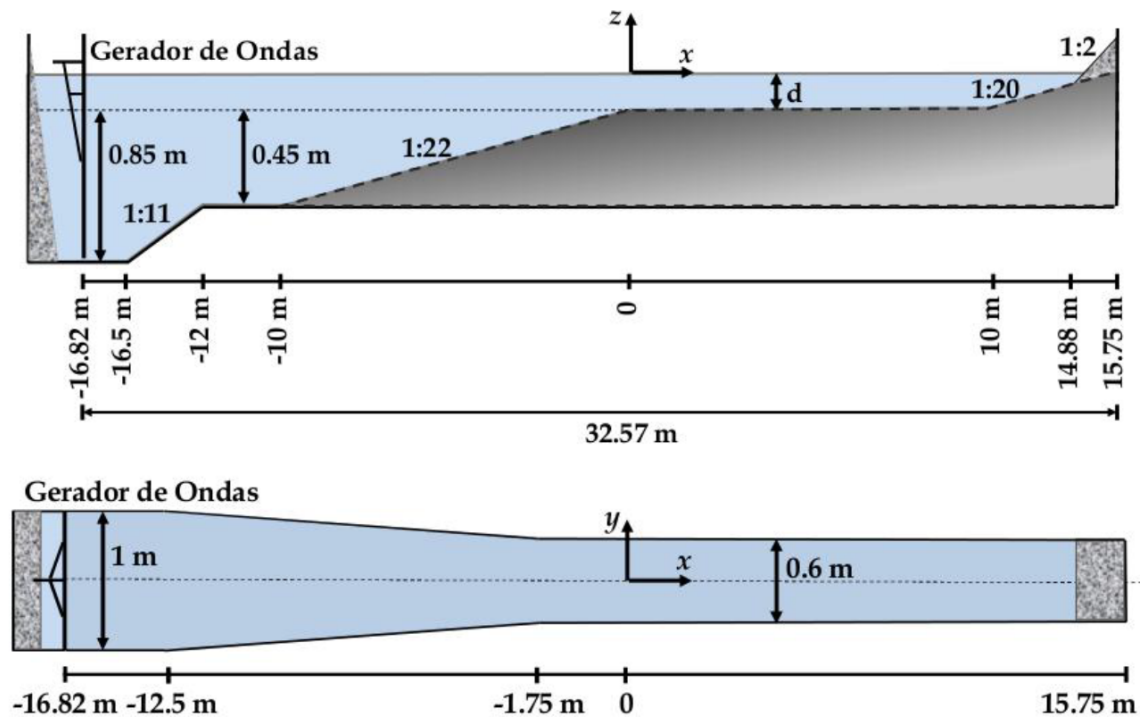


Figura 4.2: Esquema do canal com vista longitudinal (cima) e planta (baixo). Adaptado de Conde et al. 2013.

4.2 Teste da malha em canal 2D

Neste teste de malha, serão realizadas simulações com as ondas bicromáticas, cujas características estão descritos na 4.2, com uma geometria mais simples para inicialmente, aproximar que tipo de refinamento será apropriado para daqui em diante. Esta geometria será um canal rectangular bidimensional, com 20 m de comprimento e 1.05m de altura

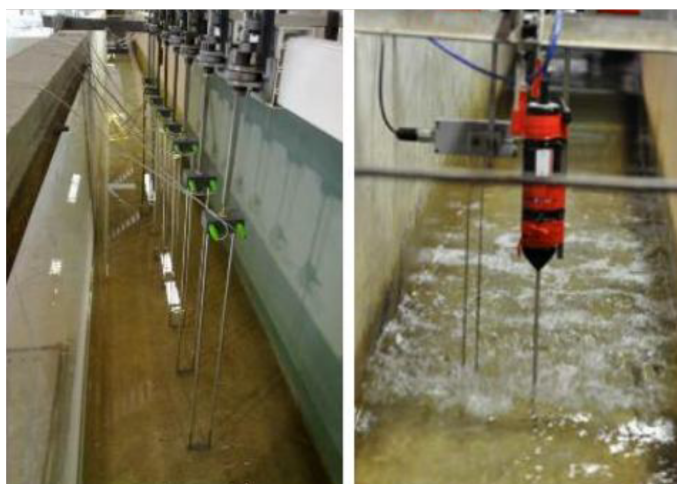


Figura 4.3: Sondas colocadas no canal no LNEC.

representado na Figura 4.5. Esta geometria consiste em 4 blocos criados utilizando a ferramenta do OpenFOAM *blockmesh* e foram estrategicamente colocados de modo a captar melhor a onda. O bloco I, destinado a captar com precisão a superfície livre da onda é o bloco mais refinado com 28 divisões na direção vertical. Os blocos II e III, uma vez que não são críticos para a captação dos fenómenos, podem ser menos refinadas com apenas 20 divisões. No entanto, estes blocos contêm também *simplegrading*, uma ferramenta que diminui gradualmente o tamanho das divisões à medida que se aproxima de uma das extremidades. Esta ferramenta é útil pois em vez de um elevado número de divisões, podemos distribuir estas pelas faces mais perto do fenómeno que desejamos analisar. Por fim o bloco IV contém 3 elementos com *simplegrading* de modo a captar melhor os efeitos junto ao fundo do canal. A Figura 4.6 representa uma das malhas resultantes utilizando 120 elementos por comprimento de onda, resultando numa malha com 126450 elementos no total. As condições iniciais presentes na tabela 4.1 foram as utilizadas neste estudo e são as mesmas que serão comuns a todas as simulações presentes nesta dissertação. Na simulação deste caso específico o tempo de simulação considerado foi de 200 segundos com um passo de tempo de 0.003s. Para o cálculo deste foi utilizado uma rotina *python* integrada no pacote do *olaFlow* que calcula diretamente o comprimento de onda e a teoria de ondas mais adequada a utilizar. No presente caso, a teoria de ondas teria de ser estudada para cada onda individualmente uma vez que se trata de uma onda bicromática. Para tal, a rotina *python* calcula a teoria adequada a cada onda e apresenta-a no gráfico *le Mehaute*, que está presente na figura 4.4.

Tabela 4.1: Condições iniciais para o teste de malha e número de elementos.

Velocidade inicial (m/s)	nula
Pressão no canal	atmosférica
Condições de parede	escorregamento
Número de elementos de malha	126450

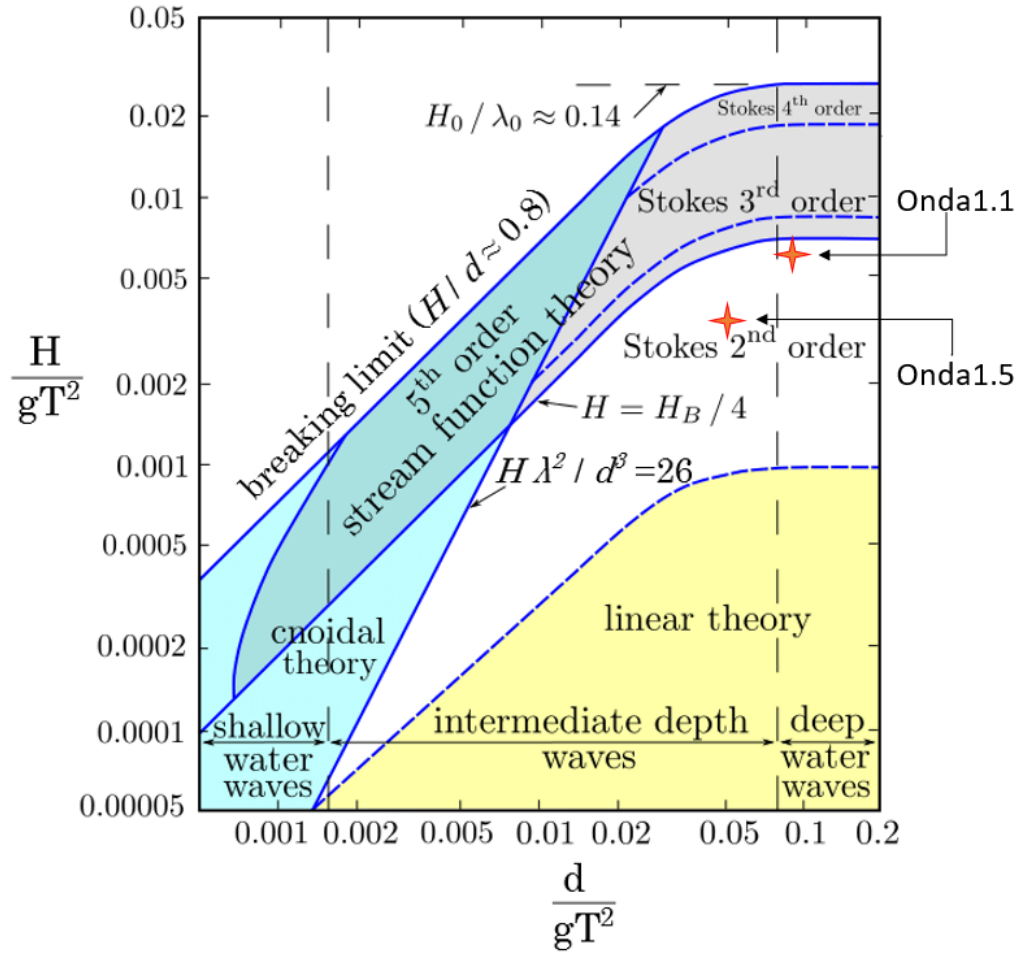


Figura 4.4: Diagrama de le Mehaute para as ondas que compõem a onda bicromática de períodos 1.1s e 1.5s. Diagrama retirado de Le Mehaute 2013.

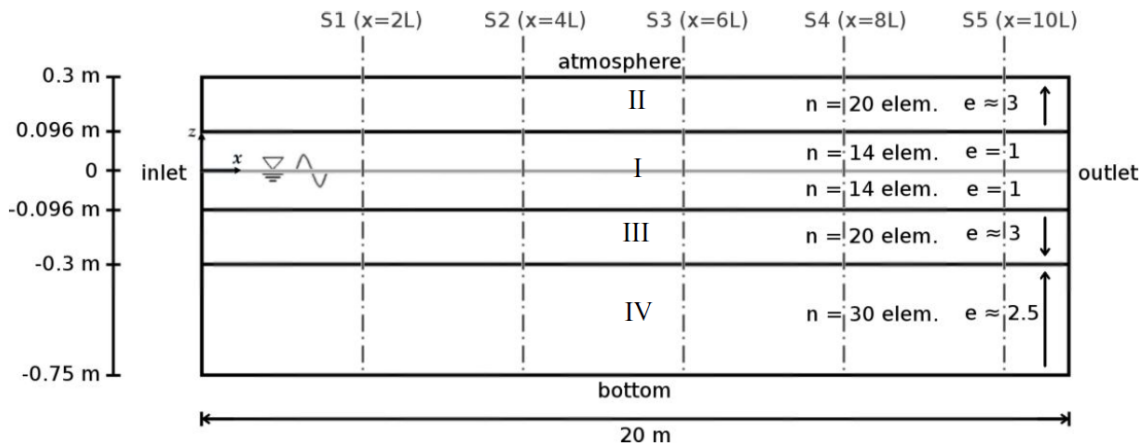


Figura 4.5: Esquema do canal simplificado indicando o número de elementos de cada bloco. Adaptado de Cardoso 2017.

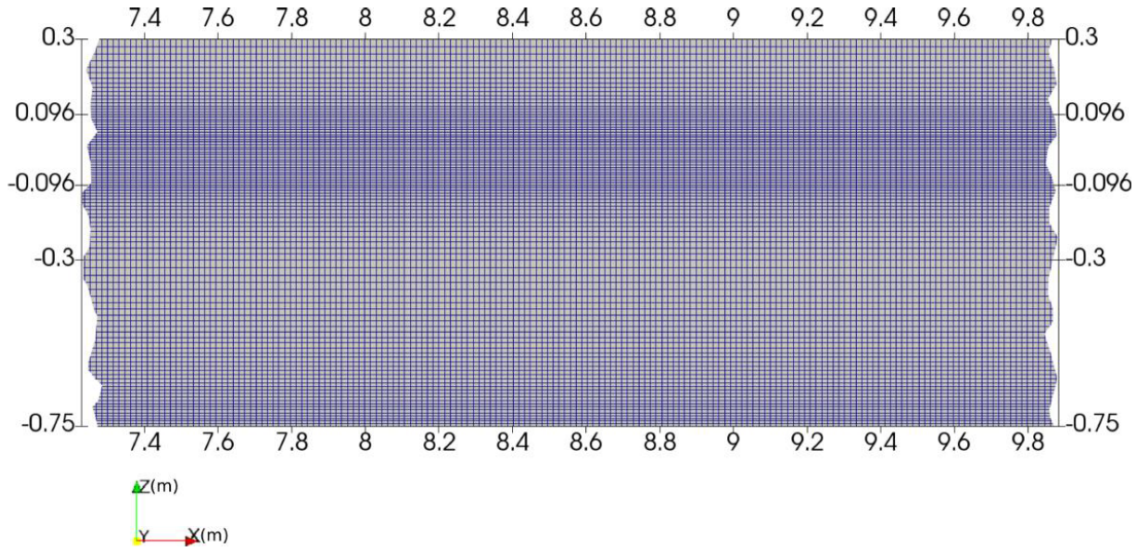


Figura 4.6: Malha utilizada no teste de malha. Adaptado de Cardoso 2017.

Como dito anteriormente, a malha foi criada utilizando o *blockmesh*. O OpenFOAM apenas suporta problemas tridimensionais, por isso, definiu-se nas faces laterais do canal a condição fronteira de "*empty*" que elimina a necessidade de uma solução nesta direção. De modo a tornar a malha eficiente, a ferramenta de expansão de malha ("*simplegrading*") que utiliza a relação de expansão e dada por:

$$e = \frac{l_n}{l_1} \quad (4.1)$$

que define a diminuição do tamanho dos elementos de malha numa determinada direção em que n é o número de elementos nessa mesma direção. Definindo $x = l_i + 1 = l_i$ como a expansão de elemento para elemento, então $dl_n = x^{n-1}l_1$ e assim, o comprimento l da aresta do bloco nessa direção é dado em função do tamanho dos elementos e da expansão por,

$$l = \sum_{i=1}^n l_i = \sum_{i=1}^n e \frac{l_1}{x^{i-1}} \quad (4.2)$$

Esta expansão é indicada na Figura 4.5 (Cardoso 2017). Na Figura 4.6 pode ver-se o efeito que esta expansão tem na malha em si.

Tabela 4.2: Características da onda bicromática utilizada no teste da malha.

Altura de onda, H(m)	0.08
Período, T(s)	1.1 e 1.5
Frequências, (Hz)	0.909 e 0.666
Profundidade do canal, d(m)	0.75
Comprimento de onda, L(m)	1.86 e 3.17

Com esta malha procedeu-se ao estudo da propagação da onda bicromática no canal com as condições previamente descritas. Foram realizados dois testes com diferentes valores de elementos por comprimento de onda, um com 80 e outro com 120. Para a análise dos testes, colocaram-se cinco sondas ao longo do canal estrategicamente posicionadas com distância de $2L$, $4L$, $6L$, $8L$ e $10L$ do gerador, sendo L o menor comprimento de onda de entre as duas ondas (1.86m). Estas sondas registam a elevação da superfície livre de modo a ser possível visualizar mais tarde a propagação da onda após tratamento de dados. A propagação das ondas através do canal está representada na figura 4.8. É possível verificar a existência de duas ondas distintas com períodos diferentes, pois é visível a sobreposição das cavas e cristas de cada uma ao longo do canal. Verifica-se também que a onda mantém a sua altura ao longo de todo o canal não havendo perda de informação entre elementos. Este é um aspeto importante para a confirmação da validade da malha, uma vez que é importante excluir problemas de refinamento de malha daqui em diante, caso existam irregularidades nas simulações previstas. Verificou-se também que não existe diferença significativa entre as malhas com 80 e 120 elementos por comprimento de onda, uma vez que os gráficos representativos da variação de superfície livre apresentam exatamente o mesmo aspeto (Figura 4.8).

Com a propagação a progredir aparentemente como previsto, realizaram-se mais duas verificações à onda, uma análise espectral e comparação com um envelope.

Realizando a análise espectral (através de FFT's) das superfícies livres captadas pelas sondas presente na figura 4.7, é possível observar as frequências fundamentais (f_1 e f_2) presentes na onda, assim como a sua amplitude. É possível também constatar a existências de harmónicas que são a soma ou subtração das frequências fundamentais. Fez-se também uma comparação das mesmas com o caso experimental do canal tridimensional para obter uma confirmação de que as frequências captadas são relativamente próximas. Pode concluir-se que é o caso uma vez que as frequências quase se sobrepõem, no entanto, à medida que a onda avança, as amplitudes do caso experimental descem, o que se deve ao facto do fundo deste ser variável face ao fundo constante desta simulação de verificação.

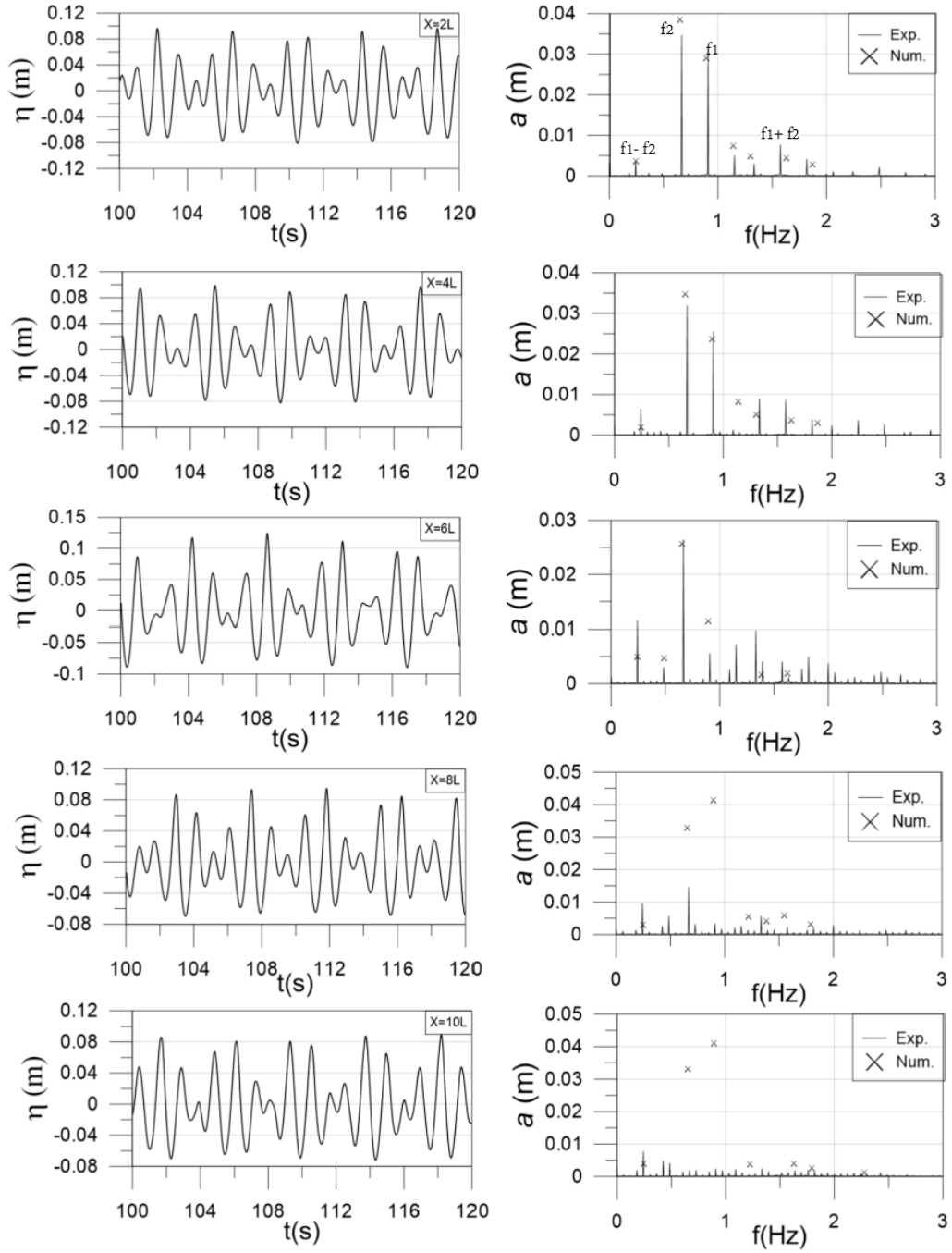


Figura 4.7: Progressão da superfície livre e espectro de frequências (FFT) presente na onda analisadas no mesmo intervalo de tempo apresentado.

CAPÍTULO 4. CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

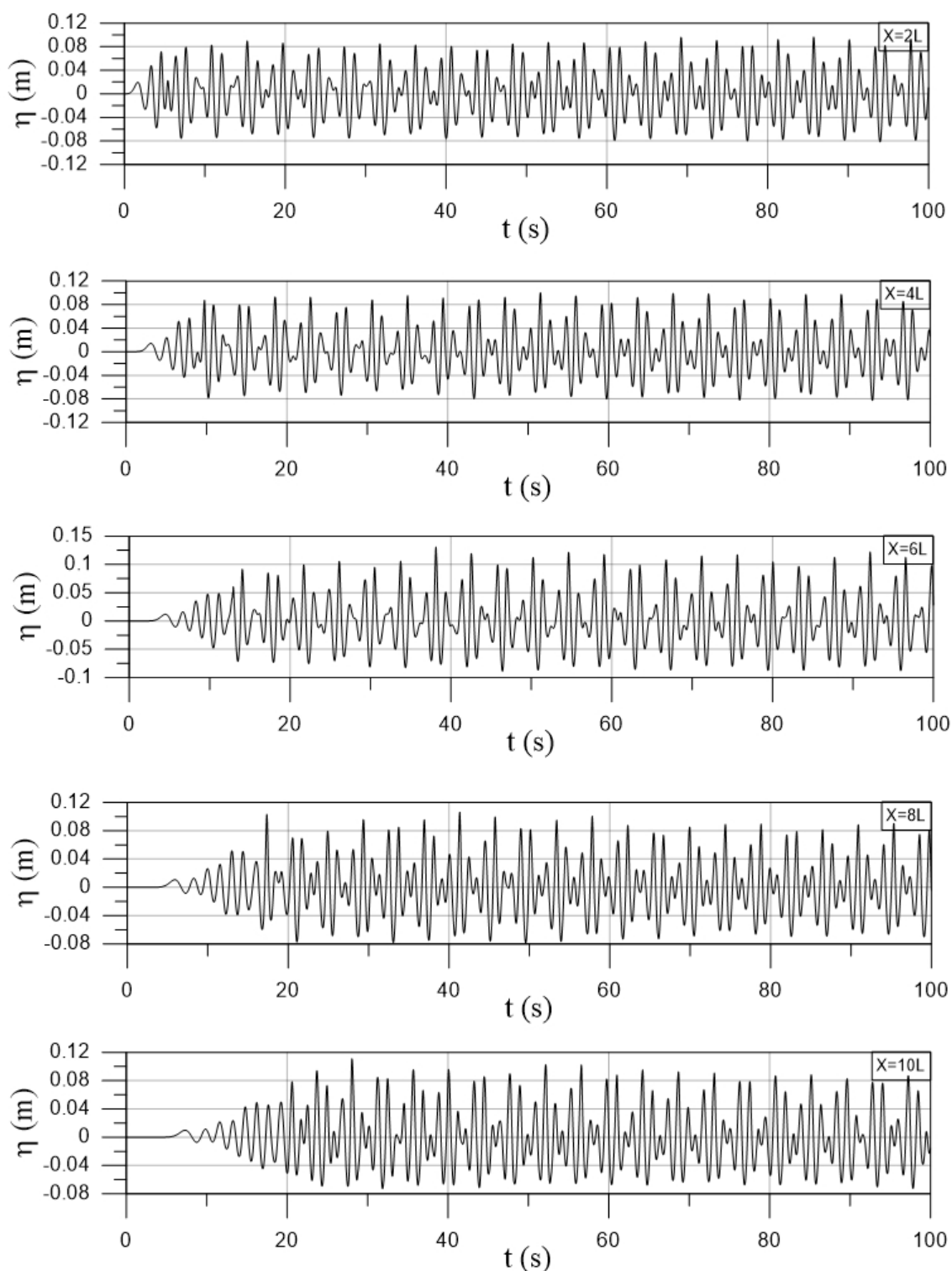


Figura 4.8: Progressão da superfície livre ao longo da geometria de teste da malha.

Na secção 2.3 foi referido que as ondas bicromáticas, apesar da sua aparente forma caótica, se propagam com periodicidade própria sendo possível o cálculo da mesma e a criação de um gráfico que o demonstra denominado por envelope. Um exemplo deste está presente na figura 2.3 em que se pode ver que a onda se repete de x em x segundos.

Isto é também o caso da onda presente neste estudo, para a qual também foi calculado e desenhado o respetivo envelope presente na figura 4.9. O período do envelope nada mais é que o correspondente à frequência que se obtém ao fazer a diferença entre as frequências fundamentais f_1 e f_2 , visíveis na figura 4.7. Ao observar o gráfico pode reparar-se que os picos das ondas ultrapassam o limite do envelope, enquanto que as cavas ficam por vezes aquém do mesmo. Isto pode ser explicado pelo facto do envelope ter sido calculado tendo em conta a teoria linear. Uma vez que estas ondas bicromáticas, podem conter elementos de segunda ordem, existe um termo extra que explica o facto da superfície livres estar ligeiramente elevada.

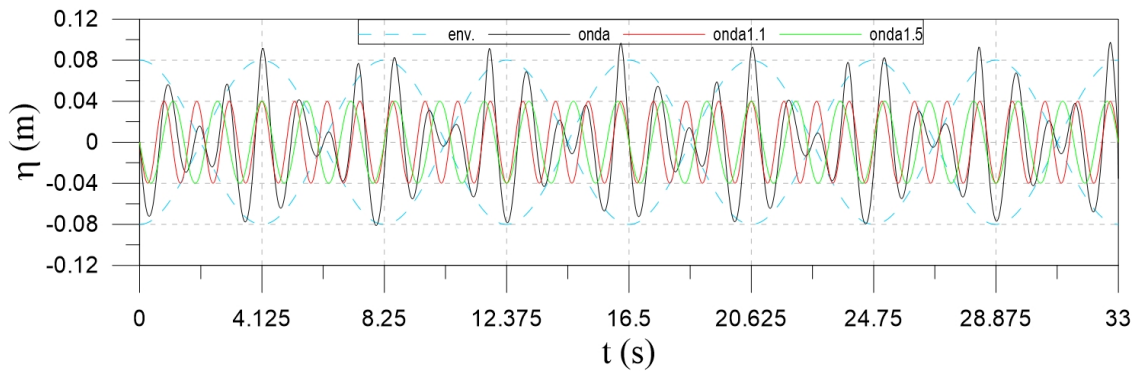


Figura 4.9: Enquadramento da onda bicromática e ondas que a formam no envelope calculado.

4.3 Parâmetros das Simulações Finais

Para as simulações finais, ambas tridimensionais, é necessário garantir vários fatores de modo a maximizar a probabilidade de obter bons resultados, ou, quanto muito, evitar erros causados por parâmetros incorretos.

Para além disso é importante definir os parâmetros da malha, passo de tempo de escrita e tempo total de simulação. Estes valores estão descritos na tabela 4.3.

Tabela 4.3: Parâmetros de simulação dos casos finais.

Tempo de simulação	200s
Passo de tempo de escrita	0.003s
Frequência de obtenção de dados	333Hz
Número de Elementos de Malha	1 699 458

4.3.1 Controlo Temporal

Um dos parâmetros a ter em conta é o controlo temporal da simulação. Este depende do número de Courant, C_o , e do passo de tempo da simulação. Estes estão interligados entre si, e são muito importantes para que os resultados obtidos em cada iteração sejam corretos. O número de Courant está relacionado com a relação de Courant–Friedrichs–Lewy (CFL) que garante a convergência das soluções em cada uma dessas iterações. Esta relação é portanto, utilizada para a determinação do passo de tempo adequado de modo a que essa convergência seja possível, pois um passo de tempo demasiado grande, impede a solução de convergir com um erro de valor aceitável e um passo de tempo demasiado pequeno pode ser desnecessário e aumentar muito a duração da simulação. No caso específico da simulação de uma onda, esta relação garante que o passo de tempo é inferior ao tempo que a onda demora a passar de um elemento para o seguinte. Para tal esta relação dita que o número de Courant seja inferior a 1. Essa relação é calculada através da expressão:

$$C_o = \frac{u_i \delta t}{c_i} \quad (4.3)$$

onde u_i representa a componente da velocidade no centro do elemento de malha, c_i as dimensões dos elementos da malha e δt o passo de tempo da simulação. De modo a respeitar esta relação, o OpenFOAM contém uma funcionalidade, incorporada no ficheiro *controlDict* presente na diretoria *system* do caso de estudo, que permite escolher de que modo se pretende fazê-lo. Para este caso de estudo, fixou-se o C_o em 0,25 e deixou-se ligada a funcionalidade *ajustTimeStep* para que o programa ajuste o passo de tempo de modo a que o C_o nunca ultrapasse o valor definido.

4.3.2 Modelo de Turbulência

Tratando-se de um estudo de propagação de ondas bicromáticas, é necessário introduzir na simulação um modelo de turbulência de modo a poder captar um eventual reben-tamento da onda. Para além disso, o próprio olaFlow requer que exista um modelo de turbulência para este tipo de estudos pois apenas o regime laminar não é suficiente para a interpretação dos fenómenos presentes. Para este caso foi então usado o modelo de turbulência $k - \epsilon$ *standard*. Este é um modelo forte para este tipo de simulações e é também dos mais usados em CFD. Para a ativação deste modelo na simulação é necessário alterar o ficheiro *turbulenceProperties* no diretório do caso e modificar a entrada de laminar para turbulento com as equações RAS, e por fim especificar o modelo de turbulência, neste caso $k - \epsilon$. É também necessário ajustar os ficheiros *nut*, *k* e *epsilon* na diretoria "0" de modo a ajustar todas as condições fronteira ao modelo de turbulência.

4.4 Caso com Variação do Fundo sem Estreitamento

4.4.1 Malha

Procedeu-se à simulação numérica da propagação das ondas para a geometria tridimen-sional indicada na figura 4.2 sem o estreitamento do canal, com o objetivo de comparar os resultados entre o canal com e sem o mesmo. Esta malha tridimensional foi gerada utilizando a ferramenta *snappyhexmesh* utilizando um ficheiro STL, para formar a rampa necessária ao estudo que se pretende. Para este caso, o ficheiro STL, representado na fi-gura 4.11, foi criado de modo a retirar parte da malha gerada pelo *blockMesh* de modo a criar a geometria final apresentada na figura 4.10.

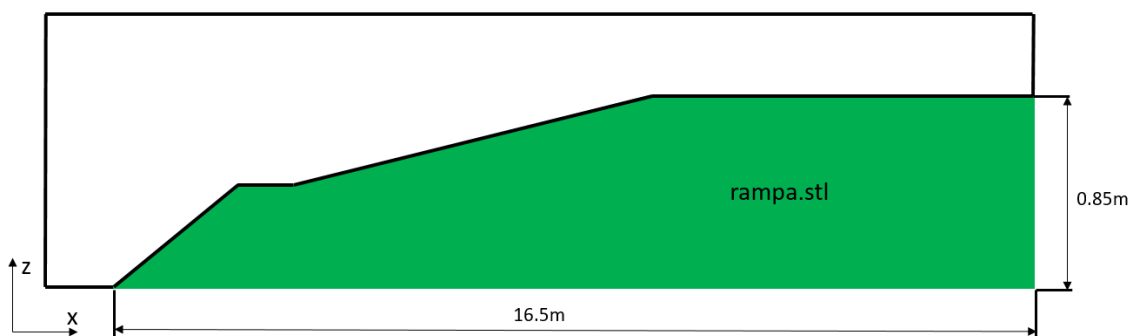


Figura 4.10: Esquema de utilização de um ficheiro STL para a criação da rampa do canal.

Uma vez que o teste de malha concluiu que não existe diferença entre 120 elementos por comprimento de onda e 80, realizou-se a simulação com o 80 elementos de modo a reduzir o tempo de cálculo. Para além disso, uma vez que o domínio computacional contém um plano de simetria, é possível reduzir a malha para metade utilizando a a função *symmetry*. Isto permite dividir a malha em 2 partes e simulando apenas uma das metades. Assim sendo, o domínio de cálculo fica com apenas 0.5m de largura.

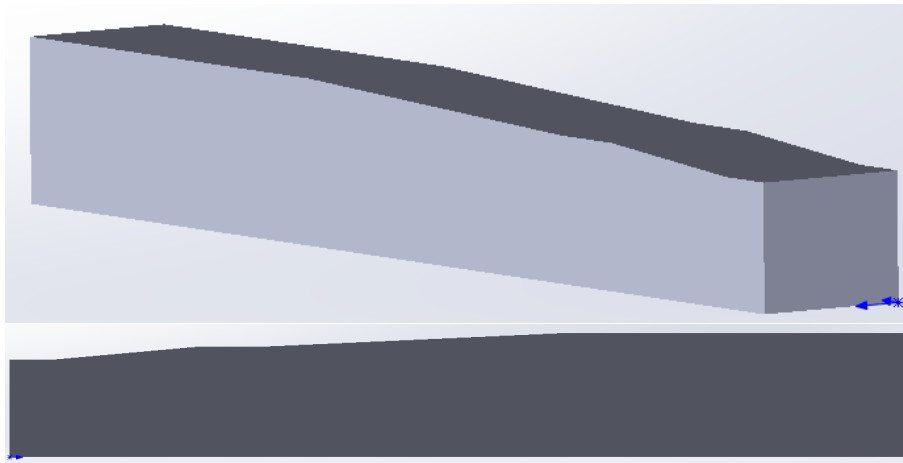


Figura 4.11: Ficheiro STL utilizado na criação da rampa do canal.

Pode observar-se as várias partes da malha do canal nas figuras 4.12, 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16. Pode observar-se o *simplegrading* também presente nesta malha de modo a que seja um pouco mais refinada perto da superfície livre tal como na malha de teste.

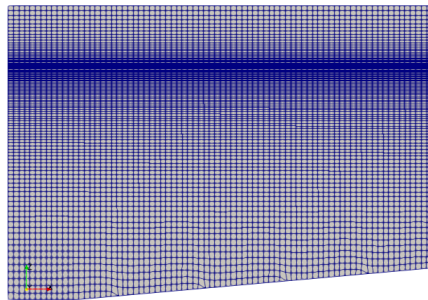


Figura 4.12: Zona inicial do canal onde é gerada a onda.

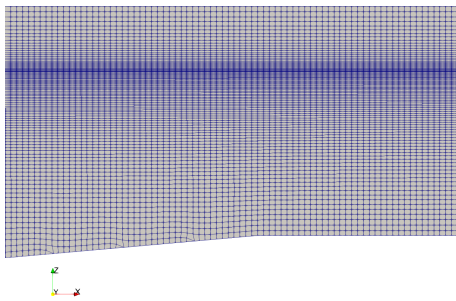


Figura 4.13: Início do canal.

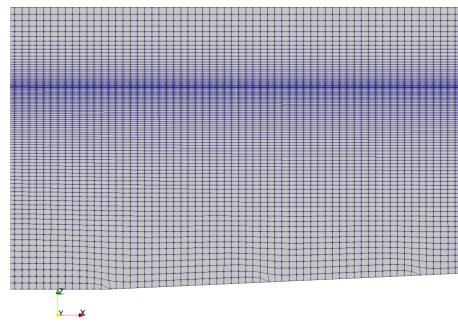


Figura 4.14: Início da segunda rampa.

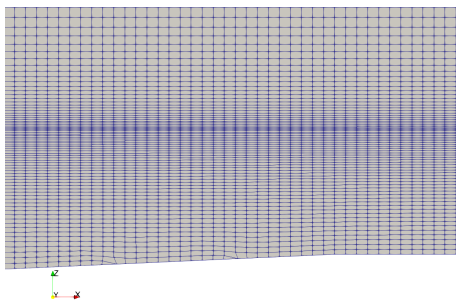


Figura 4.15: Final da última rampa.

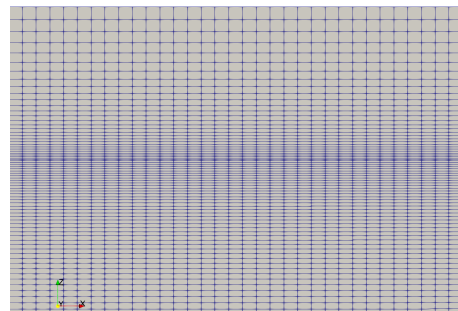


Figura 4.16: Final do canal.

4.4.2 Resultados

Analisando as séries temporais da superfície livre apresentadas na figura 4.17 deste primeiro caso, pode observar-se a formação e propagação da onda pelo canal nas localizações de -10m, -5m, -2m, 0m e 5m onde foram colocadas algumas das sondas para esta simulação.

É possível verificar que a formação e propagação das primeiras ondas é concordante com o esperado. No entanto, aproximadamente a partir de $t=60s$, a amplitude das ondas decresce consideravelmente. Isto pode ser interpretado como ocorrência de rebentação das ondas a partir deste ponto.

Uma rápida análise desta propagação leva a crer que as primeiras ondas geradas no canal, por terem uma menor frequência, conseguem atravessar o mesmo sem que ocorra rebentação. Já as seguintes rebentam por possuírem uma frequência superior. Estas correspondem às ondas já completamente desenvolvidas e que são o alvo de estudo desta dissertação. É ainda evidente que o fundo do canal tem efeito sobre a onda uma vez que no final do canal a onda propaga-se com a amplitude completamente acima da linha de água.

Apesar deste canal não possuir o estreitamento presente no canal onde o estudo experimental ocorreu, foi feita uma comparação entre as superfícies livres medidas através de sondas de ambos os canais. Essa comparação encontra-se apresentada na figura 4.18. O propósito do estreitamento do canal é o empolamento da onda de modo a aumentar a sua amplitude, logo, é possível que este aumento de amplitude provoque o rebentamento da onda. Portanto esta comparação é pertinente pois comparar o caso numérico (sem estreitamento) com o experimental (com estreitamento), demonstra que mesmo sem o estreitamento, a onda simulada aparenta ter rebentado e portanto não são tão visíveis os efeitos do fundo do canal. Uma vez que o propósito do estreitamento do canal é o empolamento da onda de modo a aumentar a sua amplitude. Comparar o caso numérico (sem estreitamento) com o experimental (com estreitamento), demonstra que mesmo sem o estreitamento, a onda simulada aparenta ter rebentado e portanto não são tão visíveis os efeitos do fundo do canal.

4.4. CASO COM VARIAÇÃO DO FUNDO SEM ESTREITAMENTO

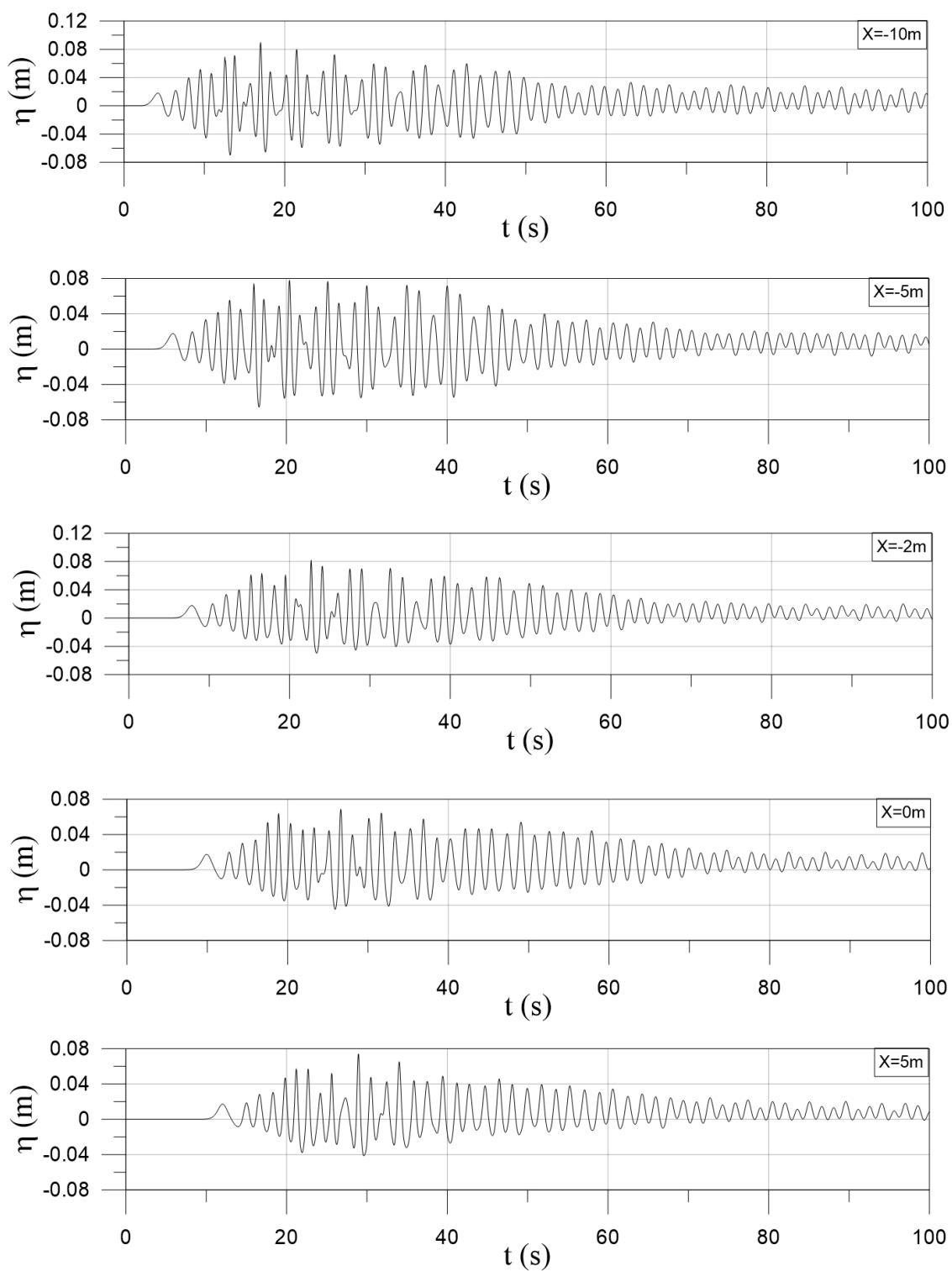


Figura 4.17: Propagação da superfície livre ao longo do canal sem estreitamento.

CAPÍTULO 4. CARACTERIZAÇÃO NUMÉRICO-EXPERIMENTAL E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

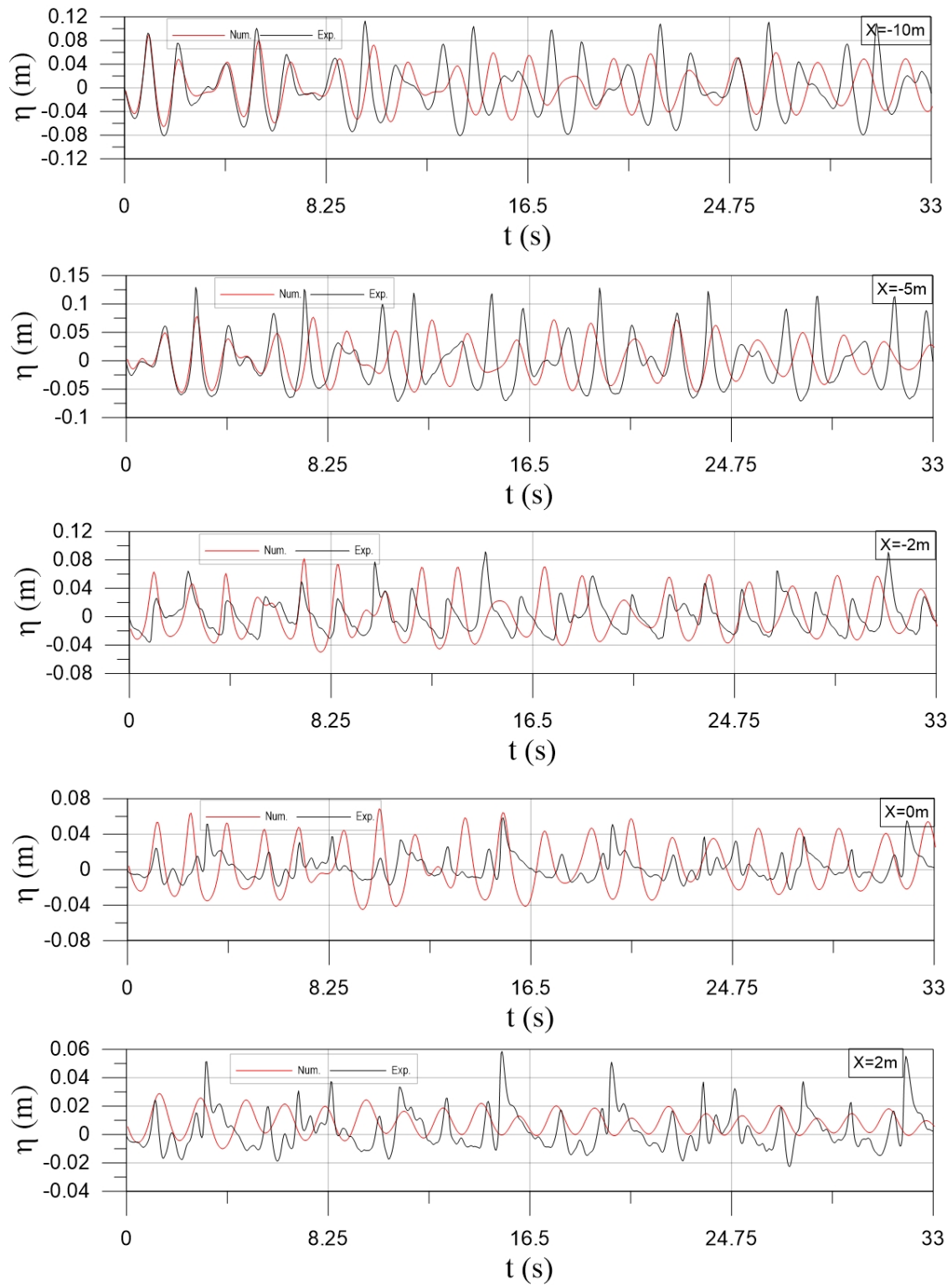


Figura 4.18: Comparação entre a propagação da superfície livre da onda bicromática simulada no canal sem estreitamento e a onda experimental no canal completo.

4.5 Caso com Variação de Fundo e Estreitamento

4.5.1 Malha

Para a construção da malha do segundo caso, utilizou-se um processo idêntico ao do primeiro, com a adição do estreitamento do canal. Para tal, utilizou-se um ficheiro STL que remove uma parte da geometria deixando o canal com a malha final pretendida. Tal como o caso anterior, existe um plano de simetria na geometria, sendo apenas necessário realizar o estreitamento de um dos lados da malha como se pode ver na figura 4.19. Uma vista em planta das várias zonas malha do canal pode ser vista nas figuras 4.20, 4.21, 4.22 e 4.23. Foi utilizado um número de elementos na direção y de modo a existir uma transição suave entre as zonas adjacentes ao estreitamento do canal e o mesmo.

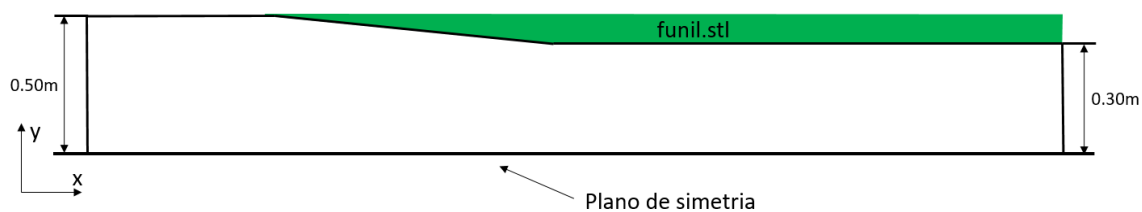


Figura 4.19: Esquema da utilização de um ficheiro STL para a formação do estreitamento do canal.

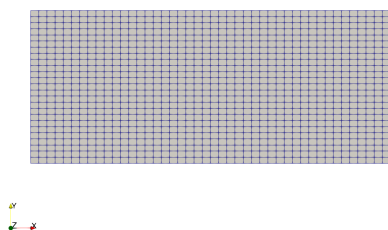


Figura 4.20: Início do canal.

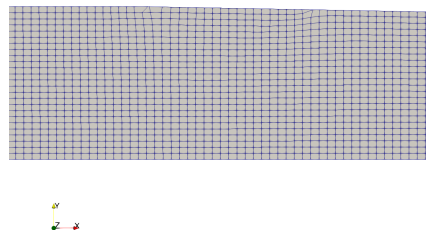


Figura 4.21: Início do estreitamento.

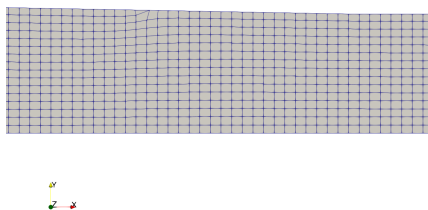


Figura 4.22: Final do estreitamento.

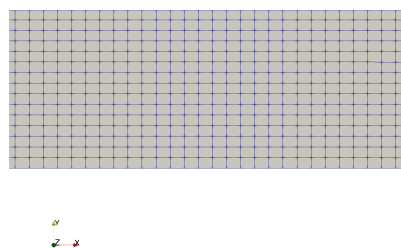


Figura 4.23: Final do canal.

4.5.2 Comparação de Resultados

Os resultados da propagação da onda bicromática estão presentes na figura 4.24. Tal como se observou no caso anterior, existe um decréscimo acentuado da amplitude da onda a partir dos 60 segundos. Mais uma vez a interpretação inicial é a de que a onda rebenta na simulação numérica. Apesar disso, é possível verificar que o estreitamento do canal contribui para o empolamento da onda, pois após uma comparação com os resultados do canal sem estreitamento (figura 4.25), é observa-se que este último tem menor amplitude mesmo depois do rebentamento da onda. Uma comparação desta simulação com os resultados experimentais presente na figura 4.26 confirma a discrepância ente as duas em termos de forma ao longo da progressão da onda no canal.

Os resultados obtidos de ambas as simulações não foram os esperados. No entanto, existem várias possibilidades que podem ser explicação para o ocorrido. Uma vez que não existe nada de errado com a maneira como se realizou a simulação em termos de utilização do *software*, foram ponderadas outras causas para a discrepância de resultados.

A primeira causa possível pode ser a falta de elementos na malha, ou seja, malha pouco refinada. Apesar de ter sido feito um teste de malha para evitar precisamente este problema, é uma possibilidade que, sendo o canal tridimensional mais complexo que o utilizado no teste, a informação não tenha sido corretamente transmitida ao longo do canal, resultando na rebentação das ondas.

Outra causa possível seria a utilização de um modelo de turbulência desadequado ao caso de estudo.

Por fim pode dever-se ao facto do algoritmo utilizado pelo *solver* *olaFlow* não funcione como esperado na simulação de ondas bicromáticas.

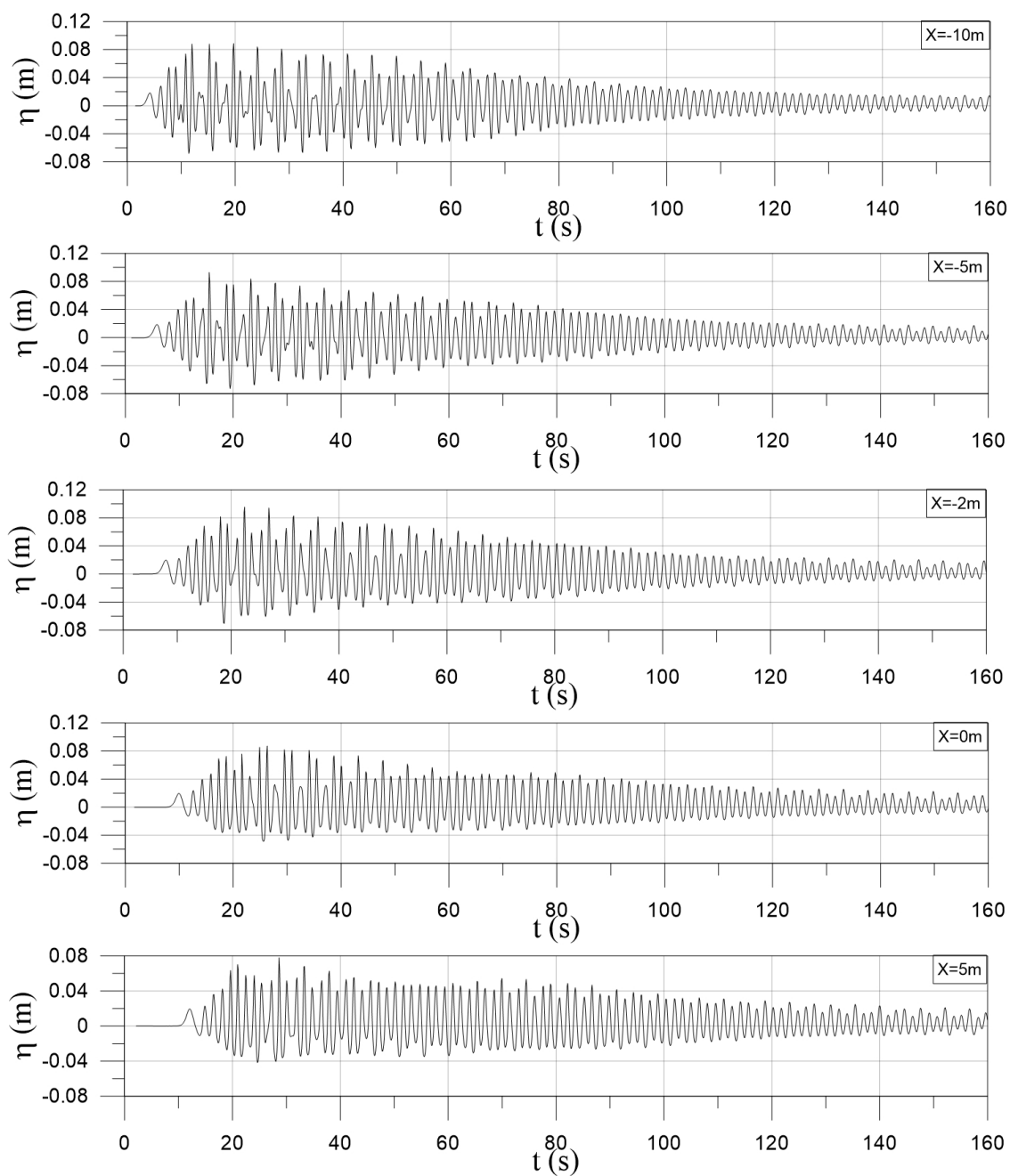


Figura 4.24: Propagação da onda bicromática no canal com estreitamento.

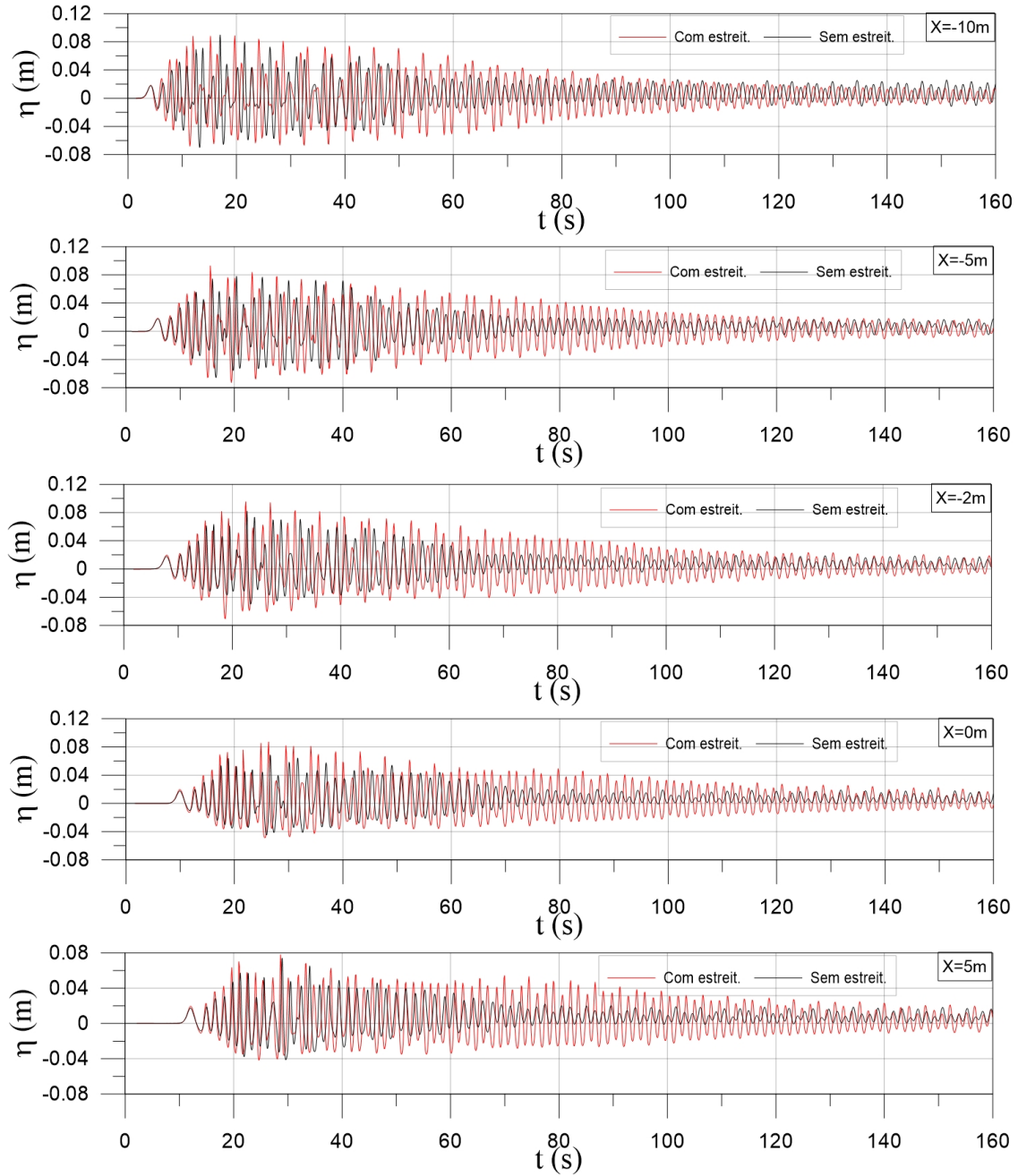


Figura 4.25: Comparação da propagação das superfícies livres de ambas as simulações.

4.5. CASO COM VARIAÇÃO DE FUNDO E ESTREITAMENTO

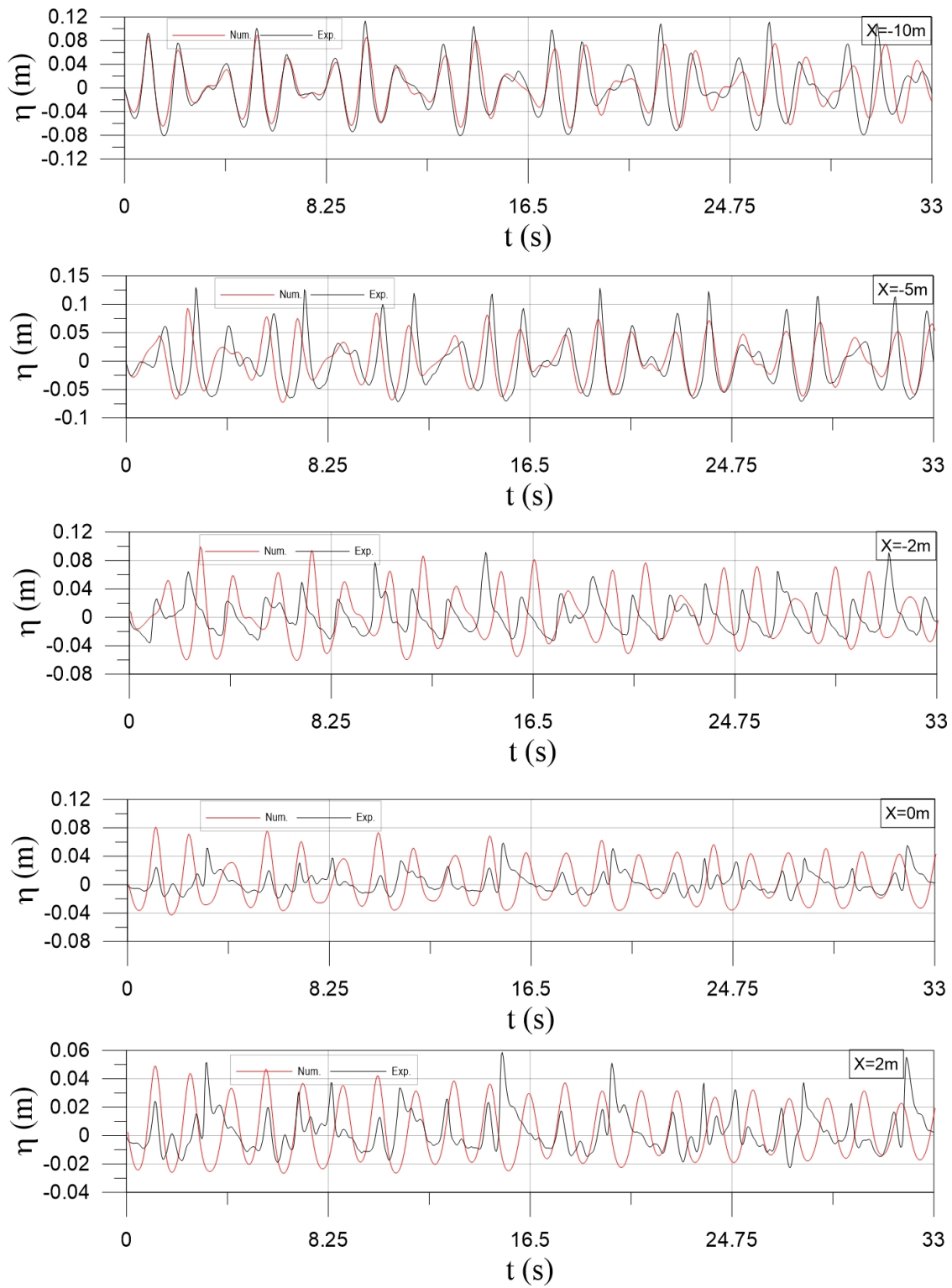


Figura 4.26: Comparação entre a propagação da superfície livre da onda bicromática simulada no canal com o estreitamento e a onda experimental no canal completo.

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O principal objetivo desta dissertação foi o de contribuir para a validação do código OpenFOAM, mais concretamente utilizando o *solver* olaFlow, no estudo da propagação de ondas bicromáticas. Para tal foi realizado um caso de estudo, de modo comparar os resultados obtidos com os resultados experimentais produzidos no canal de ondas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) por Conde et al. 2013. Este tipo de validação é necessário para garantir que estas ferramentas possam ser usadas para estudos de situações semelhantes com um grau de precisão aceitável. Este tipo de verificação contribui para o aumento de ferramentas disponíveis para o estudo de diversas áreas utilizando simulações numéricas como a engenharia costeira. Uma vez que este *software* é de livre acesso, o facto de ser capaz de realizar este tipo de estudo, torna mais acessível a realização de estudos que utilizam CFD.

Primeiramente, foi feito um teste de malha de modo a apurar o refinamento adequado a este tipo de onda. Para tal, foi realizado um estudo utilizando um estudo bidimensional de um canal sem variação de fundo, com o intuito de obter informações sobre a qualidade da malha. Mediu-se o nível da superfície livre ao longo do canal, utilizando sondas para a obtenção de dados sobre a propagação da onda no canal, e quais as frequências presentes na mesma à medida que o percorre. Foi também estudada a melhor maneira de garantir o passo de tempo adequado para o decorrer simulação. Foi para isso ativada uma funcionalidade que impõe um máximo ao número de Courant, fazendo variar o passo de tempo de modo a respeitar o mesmo. Foi por fim ajustado o passo de obtenção de dados de modo a ser possível um bom tratamento dos mesmos. Para este teste foi utilizada a mesma onda que se estudou no caso final (onda bicromática com períodos de 1.1 e 1.5 segundos e altura de 0,08m).

Os resultados do teste de malha foram analisados de modo a garantir que os elementos da mesma conseguem transmitir a informação entre si sem que se perca qualidade

nos resultados. Concluiu-se que deve haver um determinado número de elementos por cada comprimento de onda, assim como por altura de onda de modo a garantir uma boa transmissão de informação ao longo do canal. É também necessário conjugar o número de elementos de modo a que o tempo necessário para a realização de cada simulação seja o menor possível sem perda de qualidade nos resultados. É importante determinar quando a malha atinge um ponto de refinamento em que o aumento de elementos aumentaria o tempo de simulação sem melhorar a qualidade dos resultados obtidos. Com este estudo obtiveram-se bons resultados para 100 elementos por comprimento de onda, 10 por altura de onda e um passo de tempo de obtenção de dados de 0.003s. O número de Courant foi fixo a 0.25 e utilizou-se uma funcionalidade do programa para controlar o passo de tempo.

Para o caso de estudo final foram efetuadas duas simulações do canal. A primeira foi a simulação do canal completo com a exceção do estreitamento. Pretende-se estudar também a influência deste na onda comparando com a segunda simulação do caso. Esta foi realizada já com o estreitamento do canal.

Os resultados obtidos da primeira simulação foram analisados e observou-se um acentuado decréscimo na amplitude da onda a partir de um determinado valor de t . Esta discrepância foi interpretada como uma potencial rebentação da onda no canal. Comparou-se o nível da superfície livre desta simulação com os resultados experimentais presentes na bibliografia desta dissertação, e constatou-se que as frequências presentes da onda são idênticas.

Os resultados da segunda simulação, já com o canal completo, são idênticos aos da primeira no que diz respeito à perda de amplitude da parte da onda. No entanto, o efeito do estreitamento é visível pelo empolamento da onda em relação à primeira geometria.

Numa análise final, este decréscimo de amplitude pode dever-se a vários fatores. As principais são o modelo de turbulência não ser o mais adequado, malha insuficientemente refinada ou razões relacionadas com características internas do *solver* utilizado.

Uma vez que estes resultados não são satisfatórios, para trabalhos futuros, seria de grande interesse a exploração destas três razões que podem ter provocado a rebentação das ondas. Seria pertinente tentar também utilizar diferentes teorias para a análise. Uma vez que esta dissertação se insere num trabalho continuado para a validação do código OpenFOAM para estudos de ondas, o passo seguinte será a realização de um estudo com ondas irregulares, o que poderia ser interessante para compreender melhor o ocorrido nesta dissertação e talvez apurar a origem das suas discordâncias com o caso experimental.

BIBLIOGRAFIA

- Cardoso, J. M. d. S. M. (2017). *Simulação Numérica da Propagação de Ondas em Canal de Fundo Variável Utilizando o Código IHFOAM*. Tese de Mestrado.
- Conde, J., C. Fortes, E Didier, R Lemos e R Reis (2013). “Physical modelling of bichromatic waves with and without wave breaking”. Em: *Proc. Congress of Numerical Methods in Engineering, Bilbao, Spain*.
- Dean, R. G. e R. A. Dalrymple (1984). *Water wave mechanics for engineers and scientists*. Vol. 2. Advanced Series on Ocean Engineering. Singapore: World Scientific Publishing Company.
- Demirbilek, Z. e C. L. Vincent (2008). “PART II - Water Wave Mechanics”. Em: *Costal Engineering Manual*. EM 1110-2-1100. U.S. Army Corps of Engineers. Cap. 1.
- Foundation, T. O. (2019). <https://cfd.direct/openfoam/about/>. Acedido em 2019-03-20.
- Higuera, P. (2015). “Application of computational fluid dynamics to wave action on structures”. Em: *PhD. Universidade de Cantabria*.
- Hirt, C. W. e B. D. Nichols (1981). “Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries”. Em: *Journal of computational physics* 39.1, pp. 201–225.
- Le Mehaute, B. (2013). *An introduction to hydrodynamics and water waves*. Springer Science & Business Media.
- Massel, S. R. (1996). *Ocean surface waves: their physics and prediction*. Vol. 11. World scientific.
- OpenFOAM (2019). *The open source CFD toolbox*. <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/>. Acedido em 2019-03-20.
- OpenFOAM® (2013). <http://web.archive.org/web/20080207010024/http://www.808multimedia.com/winnt/kernel.htm>. Acedido em 2019-03-20.
- ParaView (2019). <https://www.paraview.org/>. Acedido em 2019-03-20.
- Versteeg, H. e W. Malalasekera (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*.

A N E X O



ÁRVORE DE DIRETORIAS DO CASO DE ESTUDO DO OPENFOAM® COM O SOLVER OLAFlow

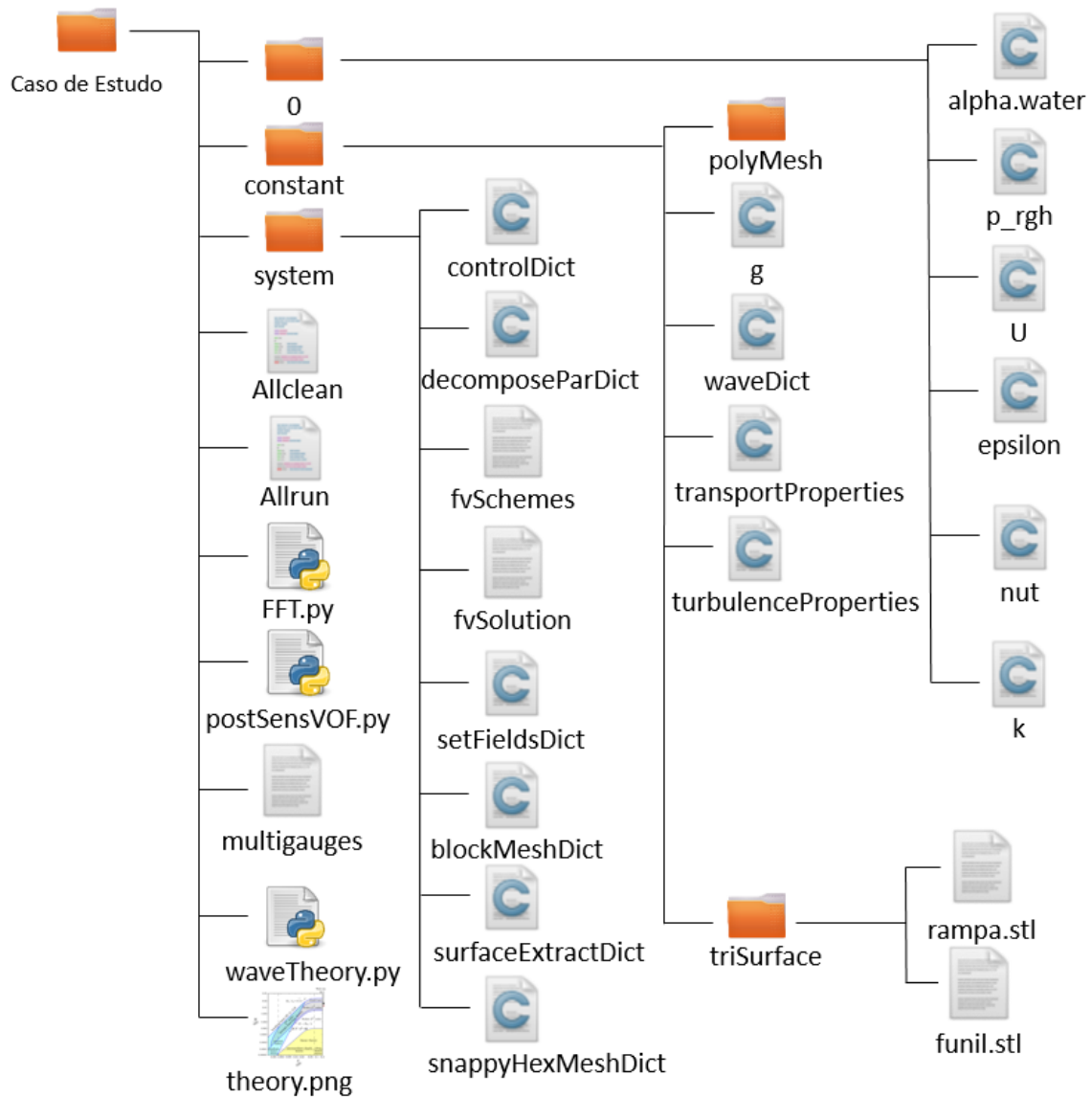


Figura I.1: Diagrama representativo das diretorias e ficheiros utilizados pelo olaFlow para a simulação de um caso de estudo.